

Ergonomie du dégivrage aéronautique en nacelles ouvertes

par

Tiphaine LE FLOCH

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES RISQUES DE SANTÉ ET
DE SÉCURITÉ DU TRAVAIL
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 14 JUIN 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Tiphaine Le Floch, 2018

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. François Morency, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Kurt Landau, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure
Institut für Arbeitswissenschaft der Technische Universität Darmstadt Arbeitswissenschaft

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Louis Rivest, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 7 JUIN 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je suis très reconnaissante envers Madame Sylvie Nadeau, ma directrice, ainsi que mes codirecteurs, Monsieur Kurt Landau et Monsieur François Morency. Je tiens à les remercier pour leur soutien, leurs nombreux conseils ainsi que de m'avoir fait part de leurs connaissances et de leur large expérience professionnelle, que je pourrai mettre en œuvre tout au long de ma carrière professionnelle.

D'autre part, je remercie le département en Ergonomie, Design et Ingénierie Mécanique (EDIM) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) en France pour m'avoir permis de réaliser cette maîtrise en double diplôme d'ingénieur ainsi que mon enseignant suiveur, Monsieur Morad Mahdjoub.

Je remercie avec beaucoup de reconnaissances les nombreux organismes français et canadiens qui m'ont très largement soutenus financièrement dans la réalisation de ce mémoire. En effet, le soutien financier des organismes français de la Région Bourgogne-Franche-Comté, la fondation de l'UTBM, le Centre Régional des Œuvres Universitaires et Scolaires de Besançon et la ville de Saint-Jean-Trolimon m'ont permis de vivre cette expérience unique à l'internationale. De plus, l'École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal m'a également attribué une bourse et le support financier offert à Madame Sylvie Nadeau par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada a permis de couvrir les frais directs de ces travaux de recherche.

Je tiens également à remercier les responsables ainsi que les employés de l'entreprise de dégivrage partenaire, sans qui ce mémoire n'aurait pu être réalisé.

Enfin, un grand merci à ma famille et particulièrement à mon compagnon Corentin Bourgeois, pour leurs précieux soutiens et nombreux encouragements.

ERGONOMIE DU DEGIVRAGE AERONAUTIQUE EN NACELLES OUVERTES

Tiphaine LE FLOCH

RÉSUMÉ

Indispensables pour assurer la sécurité aérienne au décollage, les techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes mettent quotidiennement en danger leur santé et leur sécurité. Pourtant, au meilleur de notre connaissance, l'équipe de recherche en sécurité du travail (ÉREST) est la principale équipe à avoir publiée sur cette thématique, en relevant notamment que les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes ont exprimé être plus fatigués que ceux en nacelles fermées.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'ergonomie physique des techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes. Pour ce faire, une revue critique de littérature a permis de contextualiser la situation de travail étudiée et de choisir une méthode de traitement de données cardiaques. Par ailleurs, une étude de terrain dans un aéroport canadien durant la saison hivernale 2016-2017 auprès de 12 techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes a permis d'enregistrer 15h52 de vidéo, de données physiologiques et météorologiques.

Les résultats de cette recherche ont permis une première identification des causes de fatigue physique telles que la réalisation des tâches d'aspersion de liquide anti/dégivrant, le contrôle spécial au sol, le contrôle tactile et le déplacement de la nacelle et du camion. Par ailleurs, ces résultats nous ont permis d'estimer la durée de récupération physique, une fois le travail de dégivrage en nacelles ouvertes achevé.

Il serait intéressant de mener une étude semblable auprès d'une population de techniciens du dégivrage plus importante et au sein de centres de dégivrage d'autres aéroports, soumis à différents facteurs de stress afin de couvrir au mieux l'entièreté des causes possibles.

Mots clés : Anti/dégivrage, sécurité aérienne, ergonomie, fréquence cardiaque, fatigue physique

ERGONOMICS OF AERONAUTICAL DEICING IN OPEN-BASKETS

Tiphaine LE FLOCH

ABSTRACT

Mandatory to insure the air safety during take-off, aircraft deicing technicians in open-baskets endangers their health and safety on a daily basis. To the best of our knowledge, the ÉREST research team is the main team that has published a few studies focused on that topic. Their previous results highlight the fact that open-baskets technicians expressed being physically more tired than technicians in closed-baskets.

The objective of this thesis is to study the physical ergonomics of open-baskets deicing technicians. To do so, a critical literature review allowed us to contextualize the studied working situation and to choose a model of cardiac's data processing. Furthermore, a field study was conducted in a Canadian airport during the winter season 2016-2017 which involved 12 open-baskets deicing technicians. This study allowed us to record 15h52 of videos, physiological and meteorological data.

The results of this study allowed a first identification of fatigue's factors such as the realization of aspersion tasks of anti/deicing liquid, special ground control, tactile control and moving the basket and the truck. Besides, a first estimation of the prescribed physical recovery break was done.

It would be interesting to conduct a similar study including a more important population of deicing technicians and from diverse deicing centres. Indeed, this would allow the study of different stress factors and to cover, as best as possible, the entirety of possible causes.

Keywords: Anti/deicing, air security, ergonomics, heart rate, physical fatigue

TABLE DES MATIÈRES

		Page
INTRODUCTION		1
CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE		5
1.1 Critères de sélection de l'information.....		5
1.2 Situer le sujet.....		7
1.2.1 Croissance du trafic aérien.....		7
1.2.2 Formation de glace.....		7
1.2.3 Obligations légales.....		7
1.2.4 Cibler notre étude sur les techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes		8
1.3 Identifier les risques et les facteurs de stress au travail des techniciens du dégivrage		8
1.3.1 La communication entre les acteurs.....		9
1.3.2 Organisation du travail.....		10
1.3.3 Environnement de travail.....		11
1.3.3.1 Exposition aux liquides dégivrants/antigivrants		11
1.3.3.2 Niveau sonore élevé.....		11
1.3.3.3 Niveaux d'éclairage insuffisants.....		12
1.3.3.4 Refroidissement éolien.....		12
1.3.3.5 Vibrations.....		13
1.3.3.6 Les équipements de protections individuelles et outils de travail		14
1.3.4 Facteurs de stress technologiques		14
1.4 La charge de travail et l'astreinte.....		15
1.5 Les symptômes de fatigue.....		16
1.5.1 Symptômes de fatigue physiologiques.....		16
1.5.1.1 Limites d'astreinte cardiaque.....		16
1.5.1.2 Définir les limites de l'activité musculaire et biomécanique		21
1.5.2 Symptômes de fatigue psychophysiques		22
1.6 Estimer la durée de récupération.....		23
1.7 Question de recherche et hypothèses		24
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....		27
2.1 Méthodologie générale du mémoire		27
2.2 Aspects éthiques de la recherche		28
2.3 Collecte et traitement des données.....		28
2.3.1 Lieu et période de mesures		28
2.3.2 Taille et type d'échantillon		29
2.3.3 Observations directes et indirectes du travail		30
2.3.3.1 Observations directes.....		31
2.3.3.2 Observations indirectes.....		31
2.3.3.3 Codage de l'activité de dégivrage à partir des vidéos.....		32
2.3.3.4 Facteur organisationnel : modèles d'avions dégivrés		34

2.3.4	Recueil de données physiologiques	35
2.3.4.1	Équipements.....	35
2.3.4.2	Traitement des données.....	36
2.3.5	Entrevues semi-dirigées individuelles	37
2.3.6	Recueil de données environnementales	37
2.3.6.1	Données météorologiques de l'aéroport	38
2.3.6.2	Données issues de la station météorologique de l'ÉTS	38
2.3.6.3	Regroupement et traitement des données	39
CHAPITRE 3	IDENTIFICATION OF PHYSICALLY FATIGUING TASKS PERFORMED DURING AIRCRAFT OPEN-BASKET DEICING ACTIVITIES.....	41
3.1	Introduction.....	42
3.2	Methodology.....	44
3.2.1	Population and variables studied	44
3.2.2	Data collection	45
3.2.3	Data processing.....	47
3.3	Results.....	48
3.3.1	Integration of the cardiac signal limits.....	48
3.3.2	Work-period analysis	50
3.3.3	Identification of tasks during which HR is greater than SSL	51
3.3.4	Measurement of the absolute cardiac cost per task.....	52
3.4	Discussion	54
3.5	Conclusion	56
3.6	Acknowledgments.....	57
3.7	References.....	57
CHAPITRE 4	ANALYSES COMPLEMENTAIRES.....	59
4.1	Influence des facteurs de stress ergonomiques et sécuritaires.....	59
4.1.1	Nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion	59
4.1.2	Conditions météorologiques et modèles d'avions	61
4.1.2.1	Validité des données météorologiques.....	61
4.1.2.2	Modèles d'avions	67
4.2	Durée de récupération cardiaque	69
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		73
ANNEXE I	LISTE DES PUBLICATIONS ET PREUVE DE SOUMISSION.....	77
ANNEXE II	CONFÉRENCE GFA 2018	81
ANNEXE III	DIAPORAMA GFA 2018	89
ANNEXE IV	SYSTÈME DE TRAVAIL HOMME – MACHINE EN NACELLES OUVERTES.....	97

ANNEXE V	TABLEAUX REFROIDISSEMENT ÉOLIEN.....	99
ANNEXE VI	DÉTAILS DES ÉPI ET DESCRIPTION DES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES BUSES DE DÉGIVRAGE.....	101
ANNEXE VII	CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DÉLIVRÉ PAR L'ÉTS	103
ANNEXE VIII	QUESTIONNAIRE COMPLÉTÉ LORS D'ENTREVUES SEMI- DIRIGÉES	105
ANNEXE IX	ÉVALUATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL.....	107
ANNEXE X	MARGES D'ERREUR.....	111
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Synthèse des résultats obtenus auprès des participants comparés aux résultats attendus initialement tiré de (Nadeau et al., 2017)30
Tableau 2.2	Liste et code numérique des 22 tâches observables réalisées en nacelles ouvertes tiré de (Landau et al., 2017).....33
Tableau 2.3	Classification des modèles d'avions dégivrés fournie par l'entreprise de dégivrage tiré de (Nadeau et al., 2017)34
Tableau 2.4	Regroupement des participants selon les conditions météo et leur sexe tiré de (Nadeau et al., 2017).....39
Tableau 3.1	Mean, maximum and minimum values of the personal characteristics of the participants.....44
Tableau 3.2	List and numerical code of the 22, observable open-basket tasks presented in the research of (Landau et al., 2017)45
Tableau 3.3	Cardiac strain limits greater than the resting heart rate as proposed by (Frimat et al., 1989)48
Tableau 3.4	Resting heart rate (RHR) and steady state (SSL), as well as the absolute error calculated for each of the 12 participants50
Tableau 3.5	Results in percentages of time during which the heart rate for all participants is greater than the RHR and SSL51
Tableau 3.6	Comparison of the mean absolute cardiac costs for open-basket deicing tasks, based on the limit of cardiac strain according to (Frimat et al., 1989) (on n = 25 936s of data analysed for the 12 participants).....53

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Schéma représentatif de l'organisation de la revue critique de littérature, adapté de (Rohmert et al., 1973)6
Figure 2.1	Détail des étapes de la méthodologie générale du mémoire27
Figure 3.1	Heart rate graph of deicing technician O7, deicing CRJ9 airplane.....49
Figure 3.2	Distribution of tasks for which the heart rate is greater than SSL, expressed in seconds (heart rate of 12 participants > SSL during n = 2 397 seconds)51
Figure 4.1	Distribution du pourcentage de temps médian pendant lequel la fréquence cardiaque est supérieure à la SSL selon le nombre de techniciens du dégivrage par avion adaptée de (Nadeau et al., 2017)60
Figure 4.2	Représentation graphique de la température moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O4 tirée de (Nadeau et al., 2017).....63
Figure 4.3	Représentation graphique de la température moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O6 tirée de (Nadeau et al., 2017).....63
Figure 4.4	Représentation graphique de la vitesse du vent moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O4 tirée de (Nadeau et al., 2017).....64
Figure 4.5	Représentation graphique de la vitesse du vent moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O6 tirée de (Nadeau et al., 2017).....65
Figure 4.6	Distribution du pourcentage du temps médian pendant lequel la fréquence cardiaque est supérieure à la SSL selon les modèles d'avions et les conditions météorologiques, adaptée de (Le Floch et al., 2018).....68
Figure 4.7	Distribution de la durée médiane de récupération cardiaque réelle et théorique pour les 12 participants70

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CCA	Coût cardiaque absolu
CCHST	Centre canadien d'hygiène et de sécurité du travail
CDT	Charge de travail
CÉR	Comité d'éthique et de la recherche avec participants humains
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
EASA	Agence européenne de la sécurité aérienne (<i>European aviation safety agency</i>)
EDIM	Département en ergonomie, design et ingénierie mécanique
ÉPI	Équipement de protection individuelle
ÉREST	Équipe de recherche en sécurité du travail
ÉTS	École de technologie supérieure
FAA	Administration fédérale de l'aviation des États-Unis (<i>Federal aviation administration</i>)
FC	Fréquence cardiaque (<i>Heart rate</i>)
GfA	Gesellschaft für Arbeitswissenschaft
IATA	Association internationale du transport aérien (<i>International air transport association</i>)
INRS	Institut national de la recherche et de la sécurité en France
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail
ISO	Organisation internationale de normalisation
RHR	Fréquence cardiaque de repos (<i>Resting heart rate</i>)
SSL	Fréquence cardiaque à l'équilibre (<i>Steady state limit</i>)
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
UTBM	Université de technologie de Belfort-Montbéliard en France

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

m	mètre
km	kilomètre

UNITÉS DE MASSE

kg	kilogramme
g	gramme

UNITÉS DE VOLUME

L	litre
mL	millilitre

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

m/s	mètre par seconde
km/h	kilomètre par heure

Accélération

m/s ²	mètre par seconde carré
------------------	-------------------------

UNITÉS CALORIFIQUE

Température

°C	degré Celsius
----	---------------

Densité de flux Thermique

W/m ²	watt par mètre carré
------------------	----------------------

UNITÉS DE TEMPS

Temps

h	heure
min	minute
s	secondes

Fréquence

Hz	hertz		
Bpm	battement	cardiaque	par
	minute		

UNITÉS D'ÉNERGIE

Énergie

kJ	kilojoule
----	-----------

Puissance

W	watt
kJ/min	kilojoule par minute

INTRODUCTION

Dans un contexte de mondialisation, le nombre de passagers dans l'aviation civile est en pleine croissance (International Air Transport Association, 2016). D'autre part, durant la saison hivernale, l'hémisphère nord est exposé à d'importantes précipitations et des températures inférieures à 0°C, favorisant notamment la formation de glace sur les surfaces extérieures des avions (Nadeau & Morency, 2017). Or, la présence de glace sur les avions modifie leur aérodynamisme et les conséquences peuvent être fatales au moment du décollage (Brown, 2011). Au Canada, nous pouvons citer comme exemple le tragique accident de l'avion Fokker F-28 d'Air Ontario à Dryden en 1989. Comme présentée par la commission d'enquête (Moshansky, 1992), l'un des actes dangereux identifiés lors de l'écrasement de cet avion, est l'absence d'activité de dégivrage au sol des ailes de l'avion au moment du décollage. Face aux lourdes conséquences de cet accident, Transport Canada a par la suite clairement défini et renforcé son cadre légal au travers la réglementation de l'aviation canadienne concernant notamment les procédures de dégivrage d'avions. Il est désormais obligatoire pour les compagnies aériennes de procéder au dégivrage des surfaces critiques des avions ainsi que de former du personnel aux activités de dégivrage au sol et en vol (Transport Canada, 2015). Ce mémoire ne porte que sur les procédures de dégivrage au sol des avions.

Les techniques utilisées pour dégivrer au sol les surfaces extérieures des avions peuvent être thermiques (e.g. : infrarouge) ou chimiques. Ce mémoire porte sur les techniques de dégivrage chimiques, essentiellement assurées par l'utilisation de solutions glycolées. Ces activités consistent dans un premier temps à enlever le givre des surfaces de l'avion grâce à l'application d'un liquide dégivrant sous-pression de couleur orange (appelé liquide de type 1). Puis, dans un deuxième temps, il s'agit de protéger les surfaces externes des avions grâce à l'application d'un liquide antigivrant de couleur verte (appelé liquide de type 4). Ces liquides sont contenus et chauffés dans les citernes des camions de dégivrage. Ces activités de dégivrage au sol peuvent être effectuées par les compagnies aériennes elles-mêmes, ou ces dernières peuvent également faire appel à des entreprises spécialisées dans le dégivrage aéronautique. Dans les deux cas, ces activités peuvent être réalisées à la porte d'embarquement ou au sein d'une

entreprise de dégivrage centralisée, accolée aux pistes de décollage de l'aéroport. Ce mémoire porte spécifiquement sur les activités de dégivrage au sein d'une entreprise de dégivrage centralisée.

Les activités de dégivrage sont réalisées à partir des camions de dégivrage, se déplaçant autour des avions et dotés de nacelles, ouvertes ou fermées. Nous appelons les techniciens du dégivrage, les travailleurs en charge des activités de dégivrage au sol, assurant l'absence de glace avant le décollage et contrôlant la complétion du dégivrage par contact visuel et tactile (Sierra et al., 2006). La santé et la sécurité de ces travailleurs, impliqués dans ces activités de dégivrage d'avions au sol, sont également à considérer. En effet, au Québec nous pouvons citer comme exemple le tragique accident d'un Boeing 747 de Royal Air Maroc survenu à l'aéroport de Mirabel à Montréal en 1995 lors d'une activité de dégivrage au sol. D'après le rapport d'enquête (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 1995) l'avion a commencé à rouler avant que les activités de dégivrage au sol ne soient terminées. Cet accident a entraîné la mort de trois techniciens du dégivrage et blessé deux conducteurs de camion de dégivrage. Il s'agit donc d'un secteur à risque. Plus précisément, les techniciens du dégivrage sont exposés aux risques de chutes de hauteur, aux éclaboussures de liquide dégivrant et antigivrant, aux risques de glissements, de collisions avec des avions, d'aspiration par les moteurs, aux risques liés à l'environnement (e.g. froid), aux lésions musculosquelettiques, à la fatigue ou encore aux risques liés à la pression temporelle (Nadeau & Morency, 2017). Il est donc impératif d'y mener des études afin d'améliorer la santé et la sécurité de ces travailleurs et ceci tout en considérant plus largement la sécurité aérienne. Au meilleur de notre connaissance, l'équipe de recherche en sécurité du travail (ÉREST) de l'ÉTS est la principale équipe de recherche à avoir réalisé et publié les résultats d'études centrées sur le génie des facteurs humains dans le dégivrage aéronautique. Ce mémoire fait donc partie intégrante d'un ensemble d'études menées depuis plus de cinq ans autour de cette thématique.

Les études de cette équipe de recherche sur le facteur humain visent notamment à faire une description de la charge de travail liée aux activités de dégivrage d'avions. La charge de travail fait référence aux exigences physiques et cognitives d'un travail donné, soumis aux facteurs

de stress combinés. Lors d'une précédente étude d'observations du travail de dégivrage d'avions au sol (Torres, Morency, & Nadeau, 2013), treize facteurs de stress ont été relevés tels que les facteurs organisationnels (heure travail/repos, rémunération, programme de formation), les facteurs technologiques (cabine fermée/ouverte, équipement de dégivrage, flexibilité des activités), les facteurs économiques (quantité de liquide pulvérisé, temps de cycle, coût des équipements de dégivrage) et enfin les facteurs ergonomiques et sécuritaires (environnement de travail, communication, travail d'équipe, fatigue et charge de travail). Les techniciens du dégivrage sont exposés, sans distinction interpersonnelle entre eux, simultanément à plusieurs de ces exigences, ce qui aboutit à un stress combiné. Or, lorsque la charge de travail et les facteurs de stress exogènes au système de travail sont trop importants, le travailleur atteint un état de fatigue. Les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes ont exprimé que le niveau de fatigue et la charge de travail perçue physiquement en nacelles ouvertes étaient supérieurs à ceux mesurés en nacelles fermées (Torres, Nadeau, & Morency, 2016).

D'après ces constatations, ce projet de recherche vise à étudier le facteur humain des travailleurs associés aux activités de dégivrage d'avions au sol en nacelles ouvertes. Plus particulièrement, cette recherche ne traitera pas de la fatigue cognitive, mais sera axée sur l'étude ergonomique de la fatigue physique auprès d'une population de techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes au Canada. Les retombées de cette étude permettront d'identifier des pistes d'améliorations pour la santé et la sécurité de ces travailleurs, et par conséquent plus largement sur la sécurité aérienne.

L'objectif général de cette étude est d'améliorer l'ergonomie physique des techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes. Afin de répondre à cet objectif général, voici les objectifs spécifiques :

- 1) Contextualiser la situation de travail du dégivrage en nacelles ouvertes ;
- 2) Choisir une méthode de traitement des données permettant d'identifier les causes de fatigue exprimée et d'estimer la durée de récupération nécessaire une fois le travail de dégivrage achevé ;

- 3) Identifier les tâches ayant une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes ;
- 4) Identifier les facteurs de stress ergonomiques et sécuritaires ayant une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes ;
- 5) Estimer la durée de récupération nécessaire une fois le travail de dégivrage en nacelles ouvertes achevé.

Pour atteindre ces cinq objectifs spécifiques précédemment cités, une étude de terrain a été réalisée au sein d'une entreprise du dégivrage d'avions au sol, centralisée, auprès d'une population de techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes dans la province de Québec, au Canada.

Les résultats de recherche du mémoire ont été soumis dans un article de revue (CHAPITRE 3) dans *International Journal of Industrial Ergonomics* le 24 avril 2018, dont la preuve de soumission est présentée (*Voir ANNEXE I, Figure-A I-1*). Ces résultats de recherche ont également été publiés dans un article de conférence (Le Floch, Nadeau, Landau, & Morency, 2018) (*Voir ANNEXE II*), et par ailleurs présentés à la 64^e conférence Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) à Francfort en Allemagne en 2018 (*Voir ANNEXE III*). La liste des publications autour de cette thématique auxquelles l'auteur de ce mémoire a participé à l'élaboration est présentée en (*Voir ANNEXE I*).

Le premier chapitre répond aux objectifs spécifiques 1 et 2 à partir d'une revue de littérature sur le contexte de la situation de travail étudiée et les principales méthodes d'analyse de la fatigue physique au travail. Le deuxième chapitre porte sur la méthodologie utilisée pour recueillir les données sur l'étude de terrain et traiter ces données. Le chapitre 3 est composé de l'article soumis dans *International Journal of Industrial Ergonomics* le 24 avril 2018. Dans ce chapitre les résultats de l'objectif spécifique 3 y sont présentés et discutés. Le quatrième chapitre présentera et discutera les résultats des objectifs spécifiques 4 et 5. Enfin une conclusion synthétisera les résultats obtenus et les recommandations pour de futures études pouvant être poursuivies autour de cette thématique.

CHAPITRE 1

REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE

Comme présentée en introduction, la revue critique de littérature répond aux objectifs spécifiques suivants :

- 1) Contextualiser la situation de travail du dégivrage en nacelles ouvertes ;
- 2) Choisir une méthode de traitement des données permettant d'identifier les causes de fatigue exprimée et d'estimer la durée de récupération nécessaire une fois le travail de dégivrage achevé.

1.1 Critères de sélection de l'information

Cette revue a été effectuée selon l'effet boule de neige en consultant des bases de données interdisciplinaires (Compendex, Inspec, Scopus et Espace ÉTS); la bibliothèque BiblioÉTS; des sites internet canadiens (Centre canadien d'hygiène et de sécurité du travail [CCHST], Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail [CNESST], Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail [IRSST], Transport Canada et Environnement Canada); des sites internet européens et internationaux (Agence européenne de la sécurité aérienne [EASA], Association internationale du transport aérien [IATA], Organisation internationale de normalisation [ISO], Organisation de l'aviation civile internationale [OACI]), et des sites internet d'autres pays (Administration fédérale de l'aviation des États-Unis [FAA], Institut national de recherche et de sécurité en France [INRS]). Les mots clés suivants, principalement en anglais, mais également en français, nous ont permis de saturer la littérature sur ces sujets en lien avec notre étude : *Aircraft/airplane, ergonomics, ground de-icing/deicing, anti-icing, heart rate, heart rate variability, variability, cardiac rate, cardiac stress, cardiac strain, cardiac recovery time*. Cette revue critique de littérature s'est centrée sur les dix-huit dernières années (2000 - 2018). Cependant, il existe un nombre peu important de publications concernant l'analyse physiologique de la fatigue physique des dégivreurs d'avions en nacelle ouverte. Nous avons donc dû nous référer à un certain nombre d'articles clés, plus anciens, provenant d'autres secteurs de l'activité humaine.

C'est le cas notamment des rapports d'enquêtes d'accidents ou des publications présentant des méthodes d'analyse du signal cardiaque.

La revue de littérature s'appuie sur le concept général de la fatigue et de la récupération au travail proposé par (Rohmert, Laurig, Philipp, & Luczak, 1973) et illustré de façon simplifiée en Figure 1.1.

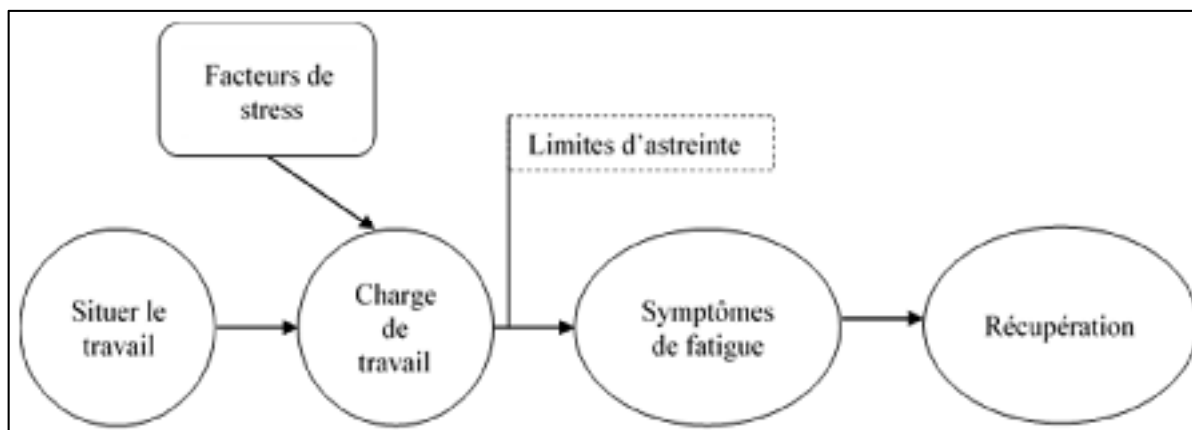


Figure 1.1 Schéma représentatif de l'organisation de la revue critique de littérature, adapté de (Rohmert et al., 1973)

Comme illustré en Figure 1.1, l'objectif 1 sera tout d'abord atteint en caractérisant la situation de travail étudiée. Puis, nous allons présenter les principaux facteurs de stress exogènes à la situation de travail, ce qui nous permettra en troisième partie de déterminer la charge de travail à laquelle sont soumis les travailleurs. L'objectif 2 sera complété à partir d'une quatrième partie, dans laquelle nous allons présenter les méthodes d'analyse des symptômes de fatigue avant de présenter en dernière partie les méthodes utilisées afin d'estimer la durée de récupération.

1.2 Situer le sujet

1.2.1 Croissance du trafic aérien

Dans le monde, tel que relevé par l'International Air Transport Association (IATA), le trafic aérien civil est en pleine croissance. En effet, le nombre de passagers en plus entre 2012 et 2013 était de + 5,3%. La tendance est confirmée par l'IATA avec un nombre de passagers de + 4,9% entre 2015 et 2016 (IATA, 2016). En Amérique du Nord, d'après l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), le trafic aérien civil international a augmenté de 3,5% entre 2015 et 2016. De plus, il s'agit du plus grand marché intérieur au monde avec une croissance de près de 4,9% sur la même année (OACI, 2017).

1.2.2 Formation de glace

En saison hivernale, l'hémisphère nord est exposé à des températures négatives et d'importantes précipitations. Ces facteurs contribuent notamment à l'accumulation de neige et l'apparition de pluie verglaçante, formant de la glace sur les surfaces des avions (Morinière, Morency, & Nadeau, 2014). Cette glace entraîne une modification de l'aérodynamisme de l'avion, et présente un risque d'accident important causé par le décrochage des dits avions au décollage (Brown, 2011).

1.2.3 Obligations légales

Afin de réduire le risque causé par la présence de glace sur les avions au moment du décollage, le Règlement de l'aviation canadienne (Transport Canada, 2015) précise un certain nombre d'exigences des systèmes de gestion de la sécurité telles que :

- L'obligation de dégivrer les surfaces critiques des avions: ailes, gouvernes, rotors, hélices, stabilisateurs, plans fixes verticaux ou toutes autres surfaces stabilisatrices de l'aéronef, ainsi que de la partie supérieure du fuselage dans le cas des aéronefs avec moteurs montés à l'arrière ;
- L'obligation de former du personnel aux activités de dégivrage au sol et en vol.

1.2.4 Cibler notre étude sur les techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes

Notre étude s'intéressera spécifiquement aux techniques de dégivrage au sol, centrées sur l'utilisation de produits dégivrant et antigivrant avant le décollage des avions. Ces activités font partie du domaine de la maintenance (Aventin, Morency, & Nadeau, 2015). De plus, comme rappelé par la Federal Aviation Administration aux États-Unis (FAA) dans un rapport technique de 2006, ce sont les techniciens du dégivrage qui sont les travailleurs en charge des activités de dégivrage au sol, par contact visuel et tactile, afin d'assurer l'absence de glace avant le décollage (Sierra et al., 2006).

1.3 Identifier les risques et les facteurs de stress au travail des techniciens du dégivrage

Une revue bibliographique a été réalisée entre 2000 et 2012, centrée sur les activités de travail des techniciens du dégivrage au sol par (Mounet, Morency, & Nadeau, 2013). Ces derniers ont identifié l'ensemble des risques à la santé et la sécurité documentés auxquels les techniciens du dégivrage étaient exposés.

Ces études ont été complétées par (Nadeau & Morency, 2017) en s'appuyant sur une large littérature interdisciplinaire entre 2009 et 2014 dans le but de recueillir des connaissances sur le facteur humain dans le domaine de la maintenance aéronautique et plus particulièrement les activités de dégivrage au sol des avions. En effet, ils ont notamment relevé qu'il s'agit d'un secteur à risques d'accidents en identifiant les principaux risques tels que les chutes de hauteur, les éclaboussures de liquide dégivrant et antigivrant, les risques de glissements, de collisions avec des avions, l'aspiration par les moteurs, les risques liés à l'environnement (e.g. froid), les lésions musculosquelettiques, la fatigue ou encore les risques liés à la pression temporelle.

(Torres et al., 2013) ont par ailleurs réalisé une observation de l'activité de dégivrage au sol ce qui leur ont permis d'identifier et d'organiser en quatre catégories, les facteurs influençant les performances au travail des techniciens du dégivrage au sol, encore appelés facteurs de stress

par (Helbig & Rohmert, 2011). Treize facteurs ont été relevés tels que les facteurs organisationnels (heure travail/repos, rémunération, programme de formation), les facteurs technologiques (cabine fermée/ouverte, équipement de dégivrage, flexibilité des activités de travail), les facteurs économiques (quantité de liquide pulvérisé, temps de cycle, coût des équipements de dégivrage) et enfin les facteurs ergonomiques et sécuritaires (environnement de travail, communication, travail d'équipe, fatigue et charge de travail). Les techniciens du dégivrage sont exposés, sans distinction interpersonnelle entre eux, simultanément à plusieurs de ces exigences, ce qui aboutit à un stress combiné, parfois difficile à maîtriser.

Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence des facteurs de stress ergonomiques et sécuritaires sur la performance au travail des techniciens du dégivrage, dont voici la synthèse des études réalisées sur ce sujet jusqu'à ce jour, dans les sections suivantes (*Voir* 1.3.1 à 1.3.3). L'influence de certains facteurs de stress technologiques sera détaillée dans la section (*Voir* 1.3.4).

1.3.1 La communication entre les acteurs

À partir d'une revue littéraire centrée sur la terminologie ainsi qu'une observation de l'activité de dégivrage au sol dans sa globalité (Günebak, Nadeau, Morency, & Sträter 2016) ont conclu que ce procédé, eus égard aux communications entre les différents acteurs, était un système socio-technique complexe. En effet, l'étude met en avant qu'il s'agit d'un système complexe, car il y a deux langues de communication impliquant la présence de deux fois plus de codes et de langages techniques. De plus, ce système est composé d'un ensemble de composants agissants en interactions pour atteindre un même but, mais ce système est complexe, car dynamique et il présente des dangers potentiels. (Landau, Nadeau, Le Floch, & Morency, 2017) ont par ailleurs décrit l'activité de dégivrage en nacelles ouvertes et répertorié toutes les interactions macroscopiques homme-machine-système (*Voir* ANNEXE IV, Figure-A IV-1).

De plus (Günebak, Nadeau, Morency, & Sträter, 2015) se sont appuyés sur un rapport de la European Aviation Safety Agency (EASA) pour présenter les problèmes de communication

comme l'une des causes d'incidents et d'accidents les plus fréquentes dans les activités de dégivrage et d'antigivrage. Cela représenterait entre 25% et 30% de l'ensemble des incidents et accidents durant l'année 2009. Une des raisons avancées dans l'étude serait que les procédures de communication dans le dégivrage au sol ne sont pas normalisées internationalement, mais l'équipe de dégivrage doit suivre des règles différentes, instaurées par diverses organisations. (Günebak et al., 2015) concluent qu'il est nécessaire qu'il y ait d'autres investigations pour approfondir le sujet de la communication au sein des équipes de dégivrage.

1.3.2 Organisation du travail

Les informations qui suivent dans cette partie ont été obtenues auprès de l'entreprise qui a accepté d'être étudiée. Ces données concernent seulement cette entreprise. Le personnel de dégivrage au sol est réparti sur la journée par quart de travail, du matin (5h-14h) ou du soir (14h-23h). Ces horaires peuvent être amenés à être modifiés selon l'importance du trafic aérien et selon l'évolution des conditions météorologiques. Une équipe réduite de nuit (23h-5h) peut également être en poste, afin de répondre aux besoins de l'aéroport. De plus, cette activité de dégivrage est saisonnière, car la période d'activité la plus importante se déroule entre le 1^{er} décembre et le 31 mars environ, selon les évolutions météorologiques chaque année. Ce travail est réalisé par deux types de techniciens du dégivrage, ceux en nacelles ouvertes et ceux en nacelles fermées. En pleine saison, il y a jusqu'à 125 techniciens du dégivrage actifs, avec en moyenne douze techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes et huit techniciens du dégivrage affectés en nacelles fermées sur les quarts de travail de jour. Ces techniciens du dégivrage ont tous été formés théoriquement durant 40h, suivis d'une formation pratique d'environ 40h également. Ces techniciens du dégivrage réalisent d'autres activités de travail que celle du dégivrage d'avions (e.g. : entretien des camions de dégivrage). Dans notre cas d'étude, nous nous intéresserons seulement au travail des techniciens du dégivrage dans la nacelle au moment du dégivrage d'avions.

1.3.3 Environnement de travail

Nous avons réalisé une revue sommaire de la littérature, centrée sur les facteurs environnementaux physiques influençant la performance au travail des techniciens du dégivrage, détaillée dans les parties suivantes (*Voir* 1.3.3.1 à 1.3.3.5).

1.3.3.1 Exposition aux liquides dégivrants/antigivrants

Une étude de (Morinière et al., 2014) a mis en avant le danger pour la santé des techniciens du dégivrage quant à l'exposition à la solution dégivrante à base de glycol. Ces propos relèvent le fait que ces solutions n'étaient pas dangereuses au niveau cutané. Une information, appuyée par un rapport au United Nations Environment Program, à l'International Labour Organization, et la World Health Organization de (Gomes, Liteplo, & Meek, 2002), indique que la seule pathologie liée à l'exposition cutanée était l'irritation temporaire de la peau. (Morinière et al., 2014) notent cependant le besoin d'étudier plus en détails les risques d'ingestion et d'inhalation de ces solutions par les vapeurs, notamment.

1.3.3.2 Niveau sonore élevé

Les techniciens du dégivrage sont exposés de façon prolongée à de multiples sources de bruit. En effet, lors de l'activité de dégivrage, la plupart du temps les moteurs des avions sont en fonctionnement, et ces travailleurs sont également à proximité des pistes de décollage de l'aéroport. Or, à ce moment précis, les moteurs d'avions sont d'importantes sources de bruit pouvant atteindre un niveau sonore d'environ 120db(A) à 300m du lieu de décollage. Au Québec, la limite d'exposition admissible au bruit est de 90db(A), pour une durée maximale de 8h (Martin, Deshaies, & Poulin, 2015). Les expositions prolongées à ces niveaux sonores élevés peuvent avoir des conséquences physiologiques majeures, autant psychologiques que physiques. Concernant les dommages physiques, des niveaux sonores élevés peuvent provoquer l'apparition d'acouphènes, des pertes d'audition ou encore des effets cardiovasculaires comme l'hypertension (Levak, Horvat, & Domitrović, 2008).

1.3.3.3 Niveaux d'éclairage insuffisants

Comme défini par le Centre canadien d'hygiène et de sécurité du travail (CCHST), un niveau d'éclairage insatisfaisant peut être causé par une lumière insuffisante, par des éblouissements ou des contrastes inappropriés. De plus, de mauvais éclairages peuvent engendrer une mauvaise estimation de la position ou de la vitesse d'un objet, constituant un risque d'accident (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2013). Ce risque est particulièrement présent pour les activités de dégivrage lors notamment du déplacement de la nacelle ou du camion. En outre, un mauvais éclairage peut également nuire à la qualité du travail exigeant de la précision, comme c'est le cas lors du dégivrage d'avions. Enfin, pour la santé des travailleurs, des risques de lésions ou de fatigue oculaire peuvent également apparaître (CCHST, 2013).

1.3.3.4 Refroidissement éolien

Afin de mesurer l'exposition aux conditions météorologiques des techniciens lors du dégivrage en nacelles ouvertes, plusieurs variables peuvent être mesurées telles que la température extérieure, l'humidité extérieure, la vitesse du vent, les précipitations ainsi que le refroidissement éolien. Le rapport de recherche rédigé pour l'entreprise partenaire (Nadeau, Le Floch, Morency, & Landau, 2017), présente la littérature émise sur le sujet par le gouvernement canadien. En effet (Environnement Canada, 2014) définit l'indice du refroidissement éolien comme la combinaison de la variable de température extérieure avec celle de la vitesse du vent. D'après un document rédigé par la (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, 2011), six niveaux de risques ont été identifiés, présentant les dangers du risque éolien pour la santé des travailleurs dans ces conditions et les actions à mener pour prévenir ces risques. Pour les activités de dégivrage, les niveaux 1 (entre 0 et -9°C) et 2 (entre -10°C et -27°C) semblent les plus pertinents à prendre en compte. Ce même document présente les limites d'exposition admissibles du refroidissement éolien avec la température (par saut de 5°C) en fonction de la vitesse du vent (par saut de 5 km/h) pour 4h d'exposition (*Voir ANNEXE V, Figure-A V-1*). Nous notons que ces documents ne mesurent pas l'importance de l'effet de l'humidité dans l'air sur le refroidissement éolien. Pourtant, les

techniciens du dégivrage sont dans un environnement très humide avec les vapeurs des liquides dégivrants et antigivrants. Ils sont également tenus de toucher à main nue des surfaces froides et mouillées. Enfin, ils sont également exposés à des précipitations telles que de la neige ou de la pluie par exemple. D'un point de vue purement physiologique (Bruder, 1994) montre qu'il y a un effet cumulatif du facteur de stress du froid seul sur un travail musculaire léger actif, et donc cela induit un effet sur la fatigue et la durée de récupération au travail.

1.3.3.5 Vibrations

Comme présenté par (CCHST, 2016), les vibrations sont des phénomènes complexes, car elles comprennent un grand nombre de fréquences, se diffusent dans plusieurs directions, avec des amplitudes variables et changent au fil du temps. L'exposition de l'humain aux vibrations est classée en deux sous-catégories, telles que les vibrations main-bras et les vibrations globales du corps. L'évaluation de l'exposition des personnes aux vibrations est réalisée en prenant en compte l'amplitude de l'accélération pondérée en fonction de la durée d'exposition, et est exprimée en m/s^2 . D'une part, un document rédigé par l'IRSST (Marcotte, 2014) indique que les vibrations sont transmises au corps humain par la colonne vertébrale en position assise, ou par les pieds en position debout. Ce même document fournit des indications quant aux vibrations émises selon les types de machines vibrantes. En effet, le niveau vibratoire des tombereaux rigides induit sur le corps complet (au 25^{ème} et 75^{ème} percentile) est compris approximativement entre $0,7\text{m/s}^2$ et $1,1\text{m/s}^2$. Au Canada, étant donné qu'il n'existe pas de réglementation officielle concernant l'exposition aux vibrations, les valeurs limites d'exposition aux vibrations sur le corps entier sont basées sur celles proposées par la norme (ISO 2631-1, 1997). Lors d'une exposition aux vibrations pendant 8h de travail, comme c'est le cas des techniciens du dégivrage, la valeur de seuil d'actions de prévention est de $0,5\text{ m/s}^2$. De plus, cette même norme met en avant la valeur de $0,9\text{ m/s}^2$ comme étant le seuil à partir duquel la relation de cause à effet entre les vibrations sur la santé des travailleurs sont probantes. D'autre part, les vibrations sont transmises à la main et au bras par la paume et les doigts (Marcotte, 2014). En raison d'absence de réglementation officielle au Canada sur cette question, l'organisme (CCHST, 2016) indique que la réglementation de référence est celle

recommandée par la norme (ISO 5349-1, 2002). Cette norme précise que pour une durée d'exposition de 8h, le seuil d'action d'exposition journalière est de $2,5\text{m/s}^2$ et la limite absolue d'exposition journalière à ne pas dépasser est de $5,0\text{m/s}^2$. Dans le document rédigé par (CCHST, 2016), ce dernier nous rappelle que la sensibilité aux effets de l'exposition aux vibrations peut varier d'une personne à l'autre. La norme (ISO 2631-1, 1997) précise un certain nombre d'effets de ces vibrations sur le corps humain. Cette norme a notamment traduit les différents niveaux d'inconforts en termes d'accélération équivalente. De plus, les vibrations peuvent avoir des conséquences pathologiques plus graves comme par exemple des déplacements vertébraux, la prise de mauvaises postures ou encore l'aggravation de lésions préexistantes. D'un point de vue purement physiologique (Bruder, 1994) montre qu'il y a un effet cumulatif du facteur de stress des vibrations seul sur un travail musculaire, et donc cela induit un effet sur la fatigue et la durée de récupération au travail.

1.3.3.6 Les équipements de protections individuelles et outils de travail

Les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes doivent obligatoirement porter certains équipements de protection individuelle (ÉPI) (e.g. : harnais de sécurité et casque de protection auditif). L'entreprise de dégivrage met également à disposition des équipements supplémentaires, que les techniciens du dégivrage ont le choix d'utiliser ou non, selon leurs besoins (*Voir ANNEXE VI, Tableau-A VI-1*). De plus, les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes utilisent des buses d'aspersion de liquide dégivrant et antigivrant avec des caractéristiques techniques précises (*Voir ANNEXE VI*).

1.3.4 Facteurs de stress technologiques

(Green, 2008) s'est appuyé sur une échelle déterminant la taille des avions « Table 2 Modified GAATA Survey Aircraft Scale index ». Cette dernière repose sur la capacité des sièges dans l'aviation civile. Il a démontré que les plus petits avions sont les plus concernés par la majorité des accidents. Mais ce chiffre doit être pris avec précaution, car il ne distingue pas les accidents en vol de ceux au sol. Il ne distingue pas non plus la taille des aéroports étudiés, alors que bon nombre d'aéroports de petite ou de moyenne taille selon la classification de (Aventin et al.,

2015) ont beaucoup moins de moyens et de procédures standardisées permettant de limiter l'erreur humaine, que les aéroports plus importants. D'ailleurs (Aventin et al., 2015) ont réalisé une étude statistique des accidents et incidents d'avions relatifs aux procédures de dégivrage/antigivrage au sol rapportés dans la base de données CADORS entre 2009 et 2014. Cette étude a permis de déduire que les avions plus petits sont les plus souvent impliqués dans des accidents dont les causes sont attribuées à des procédures de dégivrage/antigivrage inadéquates : en effet 63% de ces accidents ont impliqué des avions ayant moins de 22 sièges et 32% des avions ayant moins de 80 sièges. De plus, dans son mémoire (Torres , 2014) a réalisé une identification des situations dangereuses dans le dégivrage en nacelles ouvertes. Ce dernier a notamment identifié la tâche de contrôle spécial au sol, soit la tâche de contrôle de la qualité du dégivrage des ailes, des roues et des volets des avions depuis le sol, comme étant une situation dangereuse. Cette tâche n'est réalisée que sur certains types d'avions, dont les moteurs sont situés à l'arrière. En effet, dans le travail qui leur est prescrit, les techniciens du dégivrage doivent respecter strictement les procédures de déplacements autour de l'avion et à une certaine distance des moteurs en marche.

1.4 La charge de travail et l'astreinte

Comme présenté par (Spérandio, 1984), la charge de travail est caractérisée par une composante physique et cognitive. La charge de travail fait référence aux exigences d'un travail donné, soumis aux facteurs de stress combinés. La charge de travail n'est pas dépendante des caractéristiques individuelles des travailleurs. Cependant ces caractéristiques individuelles, sont prises en compte dans l'astreinte. En effet, les participants entre eux ne sont pas égaux face à une même charge de travail. Or, lorsque la charge de travail et les facteurs de stress exogènes au système de travail sont trop importants, par rapport à l'astreinte individuelle, le travailleur atteint un état de fatigue.

1.5 Les symptômes de fatigue

Comme présentée par (Helbig & Rohmert, 2011) la fatigue n'est pas directement mesurable, mais ce sont les symptômes de la fatigue qui le sont. Ces symptômes de fatigue peuvent être divisés en trois catégories telles que :

- Symptômes physiologiques ;
- Symptômes comportementaux ;
- Symptômes psychophysiques.

Au moment du travail, ces trois symptômes peuvent apparaître à différents moments. Dans la littérature, seuls les symptômes de fatigue physiologiques et psychophysiques ont été étudiés auprès des techniciens du dégivrage.

1.5.1 Symptômes de fatigue physiologiques

Centrés spécifiquement sur l'activité de dégivrage d'avions, les travaux analytiques de (Ayache, Morency, & Nadeau, 2013) ont proposé un protocole de travail dans le but de mesurer le niveau de fatigue générale des techniciens du dégivrage d'avions, sur les aspects physiques et cognitifs. (Ayache et al., 2013) concluent que les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes, peuvent ressentir une plus grande fatigue physique que mentale. (Helbig & Rohmert, 2011) précisent également que les symptômes de fatigue physiologique peuvent être interprétés par les diminutions des fonctions de certains organes ou du corps humain en entier, et peuvent apparaître en premier. Nous allons donc présenter en détails les méthodes d'identification des symptômes de fatigue physiologiques observables tout d'abord concernant la fatigue cardiaque et ensuite la fatigue musculaire et biomécanique, lors de l'activité de dégivrage en nacelles ouvertes.

1.5.1.1 Limites d'astreinte cardiaque

Dans la littérature, l'une des méthodes les plus répandues pour évaluer la contrainte physique sur les études de terrain est la surveillance de la fréquence cardiaque (FC). En effet, comme

présentée initialement par (Mueller, 1950), mais reprise par bon nombre d'autres chercheurs depuis, comme (Meyer, 1996) par exemple, l'étude de la fréquence cardiaque est reconnue dans l'évaluation de la fatigue. Cependant, cette variable peut être affectée par d'autres facteurs de stress tels que la température, le stress mental, la déshydratation ou encore les caractéristiques individuelles des participants étudiés (*Voir* 1.3). Différentes méthodes d'analyses des symptômes de fatigue sur le signal cardiaque ont été relevées et présentées selon l'amplitude du signal cardiaque, la durée et la fréquence d'apparition des tâches ou encore la variabilité cardiaque.

1.5.1.1.1 Méthode d'analyse selon l'amplitude du signal cardiaque

(Malchaire, 1988) présente une méthodologie d'interprétation des enregistrements de la fréquence cardiaque au travail. Cette méthodologie sera complétée notamment par les travaux de (Meyer, 1996), complétant la méthode d'analyse de la fréquence cardiaque selon l'astreinte cardiaque en vue de réduire la charge physique du travail. Dans un premier temps, il s'agit de réaliser une observation chronométrée du travail sur plusieurs participants afin de faciliter la recherche des périodes à étudier en situant les tâches les plus contraignantes en fonction de la fréquence cardiaque au court du temps. Cependant, comme précisé par (Rohmert et al., 1973), il faut également tenir compte du fait que cette variable puisse être affectée par d'autres facteurs de stress que l'activité physique telle que la température, le stress mental ou encore les caractéristiques individuelles des participants. Pour ce faire (Luczak & Rohmert, 1976) recommandent de ne pas analyser les premières minutes de mesures physiologiques afin d'écarter les réactions d'adaptation émotionnelle des personnes testées. Dans un deuxième temps (Meyer, 1996) suggère de s'appuyer sur la méthodologie d'interprétation des enregistrements continus de la fréquence cardiaque au travail, proposée par (Malchaire, 1988). Il s'agit de définir l'astreinte cardiaque par tâche selon le coût cardiaque absolu ($CCA_{t\grave{a}che}$) à partir de la fréquence cardiaque par tâche ($FC_{t\grave{a}che}$) et la fréquence cardiaque de repos (FC_{repos}) des participants, telle que présentée dans l'équation (1.1) :

$$CCA_{t\grave{a}che} = FC_{t\grave{a}che} - FC_{repos} \quad (1.1)$$

Puis, il s'agit de faire la moyenne des valeurs recueillies sur l'ensemble des périodes d'apparition de la tâche, avant de la comparer aux limites cardiaques acceptables proposées par (Frimat, Chamoux, De Gaudemaris, Cantinaux, & Amphoux, 1989). Ces derniers précisent que, dans le cas d'un travail continu et régulier, le coût cardiaque maximal d'une journée de travail est de 30 battements par minute (bpm) au-dessus de la fréquence cardiaque de repos. Enfin (Meyer, 1996) rappelle l'importance de faire la moyenne des valeurs recueillies sur l'ensemble des participants avant de conclure sur la difficulté de la tâche ou sur la nécessité de réaménagement d'un poste de travail pénible. La validation des améliorations apportées sera d'autant plus significative lors de la comparaison des coûts cardiaques avant et après lesdites améliorations.

Nous avons également recherché, dans la littérature, l'utilisation de ce type de méthodologie d'analyse de la fréquence cardiaque à des situations de travail qui se rapprochaient au mieux de celles des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. Pour cela, nous avons étudié les travaux de (Gonthier et al., 1985), centrés sur une étude expérimentale de sapeurs-pompiers. Le travail de pompier en intervention, lors de l'activité de lutte incendie, est similaire à celui de techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes, surtout lors de l'aspersion de liquide par des systèmes de buses similaires entre les deux corps de métier. Bien sûr, il existe des différences notoires, car ces travailleurs ne sont pas soumis aux mêmes facteurs de stress exogènes tels que la charge thermique par exemple. (Gonthier et al., 1985) ont étudié la charge physique des sapeurs-pompiers professionnels par enregistrements de la fréquence cardiaque sur 24 heures. Pour cela, les chercheurs ont comparé les résultats de la fréquence cardiaque mesurée sur des pompiers soumis à des tests d'efforts d'intensité connue en laboratoire, comparé aux mesures cardiaques obtenues lors d'exercices factices, réalisés dans un environnement chaud (lutte incendie et sauvetage d'une victime). Pour cela, ils se sont appuyés sur la méthodologie présentée précédemment, à savoir la comparaison de l'amplitude du signal cardiaque ou le coût cardiaque, en fonction d'un seuil de référence, comparables à ceux de (Frimat et al., 1989). Les résultats ont montré que les niveaux de travail peuvent être qualifiés de « durs » et de « très durs », mais ces résultats sont probablement sous-estimés comparés à

ceux qui seraient obtenus lors d'une intervention réelle sur un incendie avec une charge thermique et psychique plus importante.

1.5.1.1.2 Méthodes d'analyses selon la durée et la fréquence d'apparition de la tâche

Une autre méthode, complémentaire à la précédente, peut être réalisée à partir des données cardiaques synchronisées avec les observations de l'activité de travail étudiée, telle que présentée précédemment dans la première partie de la méthodologie de (Meyer, 1996). Nous avons adapté à notre étude une méthodologie d'analyse du signal cardiaque semblable à celle utilisée par (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010). D'après eux, la fréquence cardiaque au repos varie considérablement d'une personne à une autre (entre 40 à 100 bpm). Pour limiter ces effets interpersonnels et pour étudier les effets de la charge de travail sur la fréquence cardiaque, ces chercheurs ne se sont pas basés seulement sur la fréquence cardiaque absolue, comme dans l'étude précédente (Frimat et al., 1989). (Schlick et al., 2010) ont cherché à déterminer la fréquence cardiaque de travail, soit l'augmentation cardiaque par rapport à la valeur de repos, due à une activité de travail. Pour déterminer une valeur approximative de la fréquence cardiaque au repos, ils ont calculé une moyenne de la fréquence cardiaque en position allongée, en position assise ou debout. De plus, ces derniers indiquent dans leurs travaux que la fréquence cardiaque atteint rapidement la limite supérieure sous forme d'asymptote, aussi appelé « effet plateau » par (Trudeau & Bouchard, 2006). Pour déterminer cette limite (Schlick et al., 2010) cumulent à la fréquence cardiaque de repos mesurée précédemment, + 40bpm si elle a été mesurée en position allongée, + 35bpm si celle-ci a été mesurée en position assise, et + 30bpm si elle a été mesurée en position debout. En effet, lorsque la fréquence cardiaque dépasse cette limite, la réponse physiologique de l'individu est un symptôme d'une fatigue aigüe à court terme. Or, si cette limite d'endurance est trop fréquemment et trop longtemps dépassée, il y a une augmentation de la fatigue du travailleur pendant toute la durée de l'activité, se traduisant par l'augmentation du nombre de pulsations par minute, et ce jusqu'à ce que la phase de récupération soit atteinte. Cependant (Schlick et al., 2010) précisent que la limite au repos et la limite d'endurance ne sont que des valeurs indicatrices, car la fréquence cardiaque est dépendante de multiples facteurs présentés précédemment. Enfin, par la suite, à partir d'un signal cardiaque continu et de la limite

d'endurance, il est possible d'identifier les périodes de travail pendant lesquelles cette limite est dépassée, et ainsi cibler les causes de fatigue pour ces travailleurs. Les études présentées ci-dessus s'appuient sur l'amplitude du signal cardiaque pour mesurer l'astreinte cardiaque ainsi que la durée de la tâche. Cependant, d'autres chercheurs s'appuient sur la variabilité de la fréquence du signal.

1.5.1.1.3 Méthodes d'analyses selon la variabilité cardiaque

Les travaux de (Rohmert et al., 1973) ont été réalisés à partir d'analyses sur des données obtenues en laboratoire ainsi qu'expérimentalement dans le milieu du travail. Ces chercheurs observent notamment le phénomène appelé plus tard « l'effet plateau » par (Trudeau & Bouchard, 2006) comme détaillé précédemment. Selon (Rohmert et al., 1973), la fréquence cardiaque est un indice plus ou moins approprié pour évaluer la fatigue physiologique, mais l'indice de la variabilité de la fréquence cardiaque (ΔFC), soit l'amplitude de variation de la durée entre deux mesures successives, serait plus adaptée, car elle dépend principalement de la charge de travail et des facteurs de stress. La variabilité de la fréquence cardiaque n'est donc pas une nouvelle mesure, mais un paramètre supplémentaire en corrélation avec la fréquence cardiaque. La variabilité de la fréquence cardiaque est le résultat d'une superposition de différents facteurs physiologiques et psychologiques. De plus (Rohmert et al., 1973) ont établi une corrélation entre la variabilité de la fréquence cardiaque et la charge de travail qui semble plus importante dans des travaux d'ordre physiques que ceux d'ordre non-physiques. Afin d'approfondir l'analyse des effets des différents facteurs de stress sur la variabilité de la fréquence cardiaque (Luczak, Philipp, & Rohmert, 1980) ont réalisé une synthèse des études menées précédemment sur le sujet. Le but précis de cette étude est d'améliorer l'utilisation de cet indice physiologique dans l'évaluation des situations de travail. Les auteurs ont cherché à décomposer le signal cardiaque selon la variabilité de la durée entre deux battements cardiaques (unités en Hz). Tout d'abord, les auteurs indiquent que les fréquences du battement cardiaque (entre 0 et 0,5 Hz) peuvent donner une indication globale sur la teneur de l'activité du participant (repos, efforts physiques plus ou moins intenses, facteurs environnementaux, etc.). Mais lorsque la fréquence du battement cardiaque est entre $0,5 \times 10^{-1}$ et 0,5 Hz, les participants sont dans la zone dite de « variabilité de la fréquence cardiaque ». Dans cet état,

le signal cardiaque est difficile à analyser, car il présente beaucoup de « bruit ». En effet, il y a une superposition des effets sur la variabilité cardiaque, et comme l'indique (Rohmert et al., 1973) il est très difficile d'interpréter les changements de la variabilité de la fréquence cardiaque provoqués par l'influence de différents facteurs. Les auteurs (Luczak et al., 1980) ont également démontré que lorsque la charge de travail augmente, la fréquence cardiaque augmente à son tour, et la variabilité de la durée entre deux battements cardiaques tend à diminuer. De plus, la fréquence cardiaque est fonction de la durée de la tâche, mais indépendante de la difficulté de la tâche, à l'inverse de la variabilité de la fréquence cardiaque qui diminue lorsque la difficulté et la vitesse d'exécution de la tâche augmentent.

1.5.1.2 Définir les limites de l'activité musculaire et biomécanique

D'autres méthodes ont été spécifiquement utilisées aux travaux de dégivrage afin de comparer les niveaux de consommations énergétiques entre eux, tels que le montrent les travaux de (Torres et al., 2016). Ces derniers ont comparé d'un point de vue énergétique (ISO, 2004) les travaux de dégivrage en nacelles ouvertes avec ceux réalisés en nacelles fermées. Les résultats de (Torres et al., 2016) montrent que le taux métabolique moyen de l'activité de dégivrage en nacelles fermées était considéré comme « faible », soit 100 W/m^2 , et celui en nacelles ouvertes de « modéré », avec 162 W/m^2 . L'ensemble de ces résultats justifie que la situation la plus problématique dans le travail de dégivrage au sol concerne principalement les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. En se centrant sur les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes seulement (Landau et al., 2017) ont réalisé une étude du temps de leurs activités et déterminé les conséquences ergonomiques de leurs mouvements. Pour cela, cette étude a relevé 1 039 tâches enregistrées sur les vidéos de 11 techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes en activité pendant la saison hivernale 2016-2017. Ensuite, en calculant le taux énergétique requis par tâches selon les postures typiques et la durée de chaque tâche, le résultat démontre de grands écarts entre les participants (entre 4 kJ/min et 13 kJ/min). Ceci peut être expliqué par d'importantes variations entre le niveau d'expérience des participants, ou encore l'influence des conditions météorologiques sur la densité du trafic aérien. Cela dit, il a été observé dans l'étude biomécanique de (Nadeau, Salmanzadeh, Ahmadi, & Landau, 2018) que l'activité de

dégivrage en nacelles ouvertes impose aux travailleurs d'adopter certaines postures aux limites ou en dehors des zones d'atteintes, lorsque notamment les membres supérieurs sont en extension. De plus, les résultats de l'étude précédemment citée de (Torres et al., 2016) montrent que pour l'ensemble des participants masculins, la consommation énergétique du travail est qualifiée de « faible » à « modérée ». Cependant, pour l'un des deux participants féminins étudiés par (Landau et al., 2017), la consommation énergétique était proche de la limite supérieure connue. Ce qui démontre que dans certaines conditions de travail, il serait nécessaire d'effectuer un réaménagement du poste de travail.

1.5.2 Symptômes de fatigue psychophysiques

Ces symptômes de fatigue sont, d'après (Helbig & Rohmert, 2011), l'interprétation de l'individu de l'augmentation ou d'une diminution de la fatigue ressentie selon l'intensité, la durée et la composition des facteurs de stress. (Torres et al., 2016) se sont particulièrement intéressés aux symptômes de fatigue psychophysiques des techniciens du dégivrage d'avions. Pour cela, ils ont déterminé les méthodes d'évaluation qualitative de la fatigue avec l'outil Samn-Perelli fatigue scale, ou encore d'évaluation de la charge de travail avec l'outil NASA-TLX. (Torres et al., 2016) ont intégré les résultats obtenus de ces méthodes d'évaluation à partir de 20 participants volontaires travaillant dans une entreprise de dégivrage d'avions. Les résultats de cette étude montrent que le niveau de fatigue et la charge de travail perçue physiquement en nacelles ouvertes étaient supérieurs à ceux mesurés en nacelles fermées. Ces derniers ont également comparé différents niveaux de fatigue ressentie selon les différentes organisations des journées de travail des techniciens du dégivrage. Les résultats montrent que le niveau de fatigue ressentie est plus important à la fin de leur journée de travail qu'au début de celle-ci. De plus, il semblerait que les travailleurs du quart de travail du soir soient plus fatigués que ceux travaillant le matin. (Torres et al., 2016) expliquent ce résultat par le fait que les journées de travail des travailleurs du soir soient généralement plus longues (12,8h en moyenne) que les journées de travail du matin (10,5h en moyenne).

1.6 Estimer la durée de récupération

D'après (Helbig & Rohmert, 2011), lors d'études ergonomiques, il est nécessaire de considérer la période de travail la plus intense. En effet, cette étude permet d'identifier les périodes de fatigue au-dessus de la limite d'endurance, et de déterminer le temps de récupération nécessaire. Les travaux de (Wu, Hsu, & Chen, 2005) ont eu pour but de déterminer le temps de repos nécessaire des participants après avoir atteint leur limite physique selon l'évolution des variables cardiaques et respiratoires. Cette étude a été menée auprès de 24 volontaires âgés de 20 à 30 ans réalisant un exercice sur un vélo ergonomique, d'intensité élevée et connue, pendant quelques minutes et en faisant travailler exclusivement les muscles jambiers. Les participants ont été regroupés selon leur indice de capacité cardio-respiratoire. D'après le test, les chercheurs constatent qu'après avoir atteint sa limite maximum, la fréquence cardiaque et le volume d'oxygène consommé (VO_2), diminue rapidement durant les premières 3 ou 4 minutes de repos puis diminuent graduellement jusqu'à rejoindre leurs valeurs initiales. Dans ce contexte, selon eux, il serait plus efficace de travailler moins longtemps avec des pauses plus courtes et plus fréquentes que de travailler jusqu'à atteindre sa limite physique et prendre une longue pause moins fréquente. De plus, il semblerait que la variable de la fréquence cardiaque tend à prendre plus de temps à revenir à son état d'origine que la variable du VO_2 . Ensuite (Chen & Lee, 1998) ont réalisé une étude afin de développer une équation simplifiée (1.2) du coût de récupération cardiaque initialement proposé par (Terrace et al., 2006), avec T le temps de récupération cardiaque et ΔFC l'augmentation cardiaque, mesurée à partir de la fréquence cardiaque au repos :

$$\text{Coût de récupération cardiaque} = \frac{T \times (\Delta FC - 1)}{\ln(\Delta FC)} \quad (1.2)$$

Pour développer ce modèle, ils ont recruté sept participants sains de 24 à 37 ans pour réaliser des tâches combinées en dynamique et en statique, d'intensité connue et variable. Le temps de repos nécessaire pour retrouver le niveau initial était mesuré sitôt après l'effort physique et en position assise et immobile. Les résultats de cette étude nous montrent qu'aucune augmentation de la fréquence cardiaque ou du coût de récupération cardiaque ne peut complètement évaluer

le stress physique encouru lors d'un exercice combiné en statique et dynamique. Cependant, le coût de récupération cardiaque serait sensible à la fois aux variations des charges de travail dynamiques et statiques combinées. (Chen & Lee, 1998) concluent donc qu'il est possible d'utiliser ce modèle de coût de récupération cardiaque comme index pour évaluer le coût de l'effort physique combiné.

1.7 Question de recherche et hypothèses

Pour conclure la revue critique de littérature, nous constatons que l'étude du facteur humain sur le travail de dégivrage en nacelles ouvertes est donc unique et novatrice et au vu des résultats des études précédentes, ce poste de travail doit être amélioré. Cette revue critique de littérature nous a permis de mieux comprendre la situation de travail étudiée ainsi que de choisir une méthode de traitement des données permettant d'identifier les causes de fatigue exprimée et d'estimer la durée de récupération nécessaire une fois le travail de dégivrage achevé.

Les questions de recherche sont les suivantes :

- Quels sont les facteurs (tâches et autres) ayant une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes ?
- Combien de temps ces travailleurs ont-ils besoin pour récupérer, une fois le dégivrage d'avions achevé ?

Voici donc nos hypothèses qui en découlent :

- 1) Durant l'activité de dégivrage en nacelles ouvertes, les tâches d'aspersion de liquide dé/antigivrant, le déplacement de la nacelle et du camion, le contrôle au sol et le contrôle tactile ont une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes.
- 2) Les facteurs de stress ergonomiques et sécuritaires relatifs aux modèles d'avions dégivrés, au nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion et aux conditions

météorologiques ont une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes.

- 3) Lorsque l'activité de travail est achevée, la durée de récupération cardiaque des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes est inférieure à 5 minutes.

Afin de répondre à ces hypothèses, le chapitre 2 de ce mémoire développe les aspects méthodologiques utilisés dans notre étude, le chapitre 3 répond à l'hypothèse 1 par le biais d'un article avec comité de pairs soumis à la revue *International Journal of Industrial Ergonomics*, et le chapitre 4 développe les hypothèses 2 et 3.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Méthodologie générale du mémoire

Dans le cas de notre étude, comme définit par (Leedy & Ormrod, 2013), il s'agit d'une recherche quantitative et exploratoire d'interprétation d'un phénomène complexe. Une stratégie de travail a donc été mise en place afin d'atteindre les objectifs fixés, dont voici le détail des étapes en Figure 2.1. En effet, à partir de la revue littéraire, du problème relevé et des hypothèses posées, nous avons rédigé notre protocole d'intervention sur le terrain auprès de volontaires dans une entreprise. Ce dernier a été approuvé par le comité d'éthique et de la recherche avec participants humains (CÉR) de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Suite à quoi, nous avons pu effectuer la cueillette de données, les synchroniser entre elles avant de nous renseigner dans la littérature sur les différentes méthodes d'analyse à privilégier. Après avoir traité ces données, nous avons interprété nos résultats, avant d'en tirer des conclusions et de présenter un certain nombre de recommandations auprès de l'entreprise étudiée.

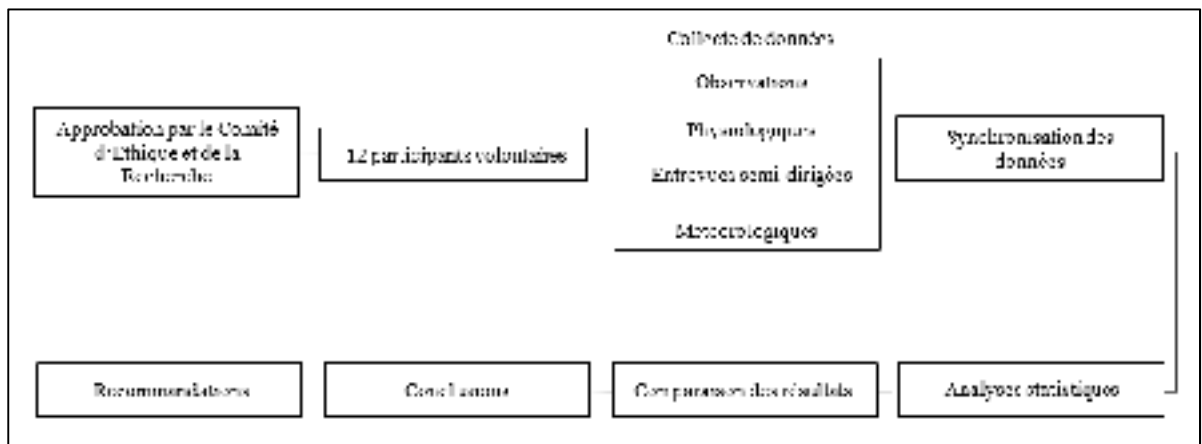


Figure 2.1 Détail des étapes de la méthodologie générale du mémoire

2.2 Aspects éthiques de la recherche

Ce projet de recherche implique la participation d'êtres humains lors de la collecte de données. De ce fait, une demande d'autorisation a été requise et obtenue auprès du CÉR de l'ÉTS en novembre 2016 (*Voir* ANNEXE VII, Figure-A VII-1). Notre démarche de recherche a été également acceptée et soutenue par l'entreprise d'accueil. Afin de respecter notre engagement éthique, nous avons réalisé une présentation des objectifs et du processus de recherche à l'ensemble des personnes pressenties. A l'issue de celle-ci, nous avons obtenu le consentement écrit et signé de chaque participant acceptant volontairement de participer à notre étude. Nous avons également respecté le droit à la vie privée des participants, en anonymisant le traitement des données et en rendant impossible l'identification des participants grâce à la mise en place d'un système de codage alphanumérique. De plus, nous avons conservé dans un endroit sécurisé toutes les informations et données recueillies, auxquelles seules les personnes autorisées avaient accès. Enfin, nous avons averti le CÉR de tous les changements rencontrés lors de l'expérimentation, et obtenu toutes les approbations nécessaires.

2.3 Collecte et traitement des données

L'étude de terrain permet de recueillir des informations complémentaires à celles fournies dans la littérature. Pour cela, nous avons élaboré un processus de collecte de données adapté à l'étude de terrain selon quatre sources telles que l'observation du travail directe et indirecte, la prise de mesures physiologiques, la réalisation d'entrevues semi-dirigées individuelles ainsi que la prise de mesures météorologiques. Les interventions auprès des participants ont été réalisées dans un souci de nuire le moins possible aux activités de dégivrage.

2.3.1 Lieu et période de mesures

Notre projet de recherche a été réalisé auprès d'un aéroport centralisant les activités de dégivrage au sol des avions, au sein d'une compagnie multinationale spécialisée. Les activités de dégivrage au sol étant dépendantes des conditions météorologiques, la cueillette des données s'est déroulée sur la période hivernale, du 22 décembre 2016 au 18 avril 2017 inclus.

Durant cette période, nous avons sélectionné les journées de mesure selon les prévisions météorologiques quotidiennes annoncées, selon les journées disponibles de l'analyste et selon les journées de travail des participants volontaires. Nous nous sommes donc rendus 18 jours en entreprise selon ces conditions.

2.3.2 Taille et type d'échantillon

Les personnes pressenties pour participer à cette étude sont des techniciens (hommes et femmes) du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes. Aucun critère d'exclusion n'a été pris en compte lors de ce recrutement. Lors de cette phase de recrutement, la population totale de techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes était d'environ 40 travailleurs. Avec une proportion de 50%, un intervalle de confiance de 95% et une marge d'erreur de 25%, la taille minimale de notre échantillon est de $N=12$. 14 participants ont accepté de participer volontairement à notre étude. Le Tableau 2.1 est une synthèse des résultats obtenus comparés à ceux initialement prévus et tirés du rapport de recherche (Nadeau et al., 2017). En effet, sur ces 14 volontaires prévus initialement, un des participants a terminé plus tôt la saison de dégivrage vers le 31 mars 2017, quittant donc définitivement l'étude. De plus, sur 13 participants, nous avons eu un problème d'enregistrement vidéo pour l'un d'entre eux, ce qui a conduit à rendre ces résultats intraitables. Ensuite, nous n'avons pu commencer à prendre des mesures environnementales de la station météo VANTAGE PRO 2 qu'à partir du 14 mars 2017 jusqu'au 18 avril 2017, soit sur trois périodes d'activités de dégivrage. Enfin, sur les 13 personnes observées, nous avons réussi à en rencontrer dix du 21 mars 2017 au 18 avril 2017 pour les entrevues semi-dirigées. En effet, deux personnes ayant participé à l'étude l'ont quittée parce qu'elles ne venaient travailler que sur appel ponctuellement. Une autre personne n'a pas pu venir aux deux visites que nous avions planifiées avec elle. Lors de l'observation du travail et le recueil de données physiologiques de 12 participants, 75 avions ont été dégivrés en tout.

Tableau 2.1 Synthèse des résultats obtenus auprès des participants comparés aux résultats attendus initialement tiré de (Nadeau et al., 2017)

Nombre	Observation du travail	Données physiologiques	Entrevues semi-dirigées	Mesures météorologiques
Mesures attendues initialement	14	14	14	14
Mesures complètes	12	12	11	3
Mesures incomplètes	1	1	0	0
Mesures non-obtenues	1	1	3	11

Pour répondre à l'hypothèse 1 présentée initialement en partie 1.7 de ce mémoire, nous avons écarté les deux participants dont les données issues de l'observation du travail et des données physiologiques étaient incomplètes ou non réalisées. Pour répondre à l'hypothèse 2, nous avons écarté ces deux mêmes participants cités précédemment, pour les mêmes raisons. Par ailleurs, afin de nous assurer de mesurer l'influence du facteur de stress des modèles d'avions nous avons isolé les participants selon leur genre et selon les conditions météorologiques auxquels ils étaient exposés. Nous avons donc écarté les deux participantes féminines ainsi que les deux participants dont les conditions météorologiques étaient incomparables à aucune autre (Voir partie 4.1.2.1). Enfin, pour répondre à l'hypothèse 3, nous avons écarté les participants dont les données issues de l'observation du travail et des données physiologiques étaient incomplètes ou non obtenues.

2.3.3 Observations directes et indirectes du travail

Les observations du travail de dégivrage d'avions en nacelles ouvertes ont été réalisées lorsque les prévisions météorologiques semblaient propices aux activités en question. Ces journées ont été planifiées trois ou quatre jours en avance avec les responsables de l'entreprise, en nous

précisant l'importance de la charge de travail prévue. Nous avons choisi d'étudier un seul participant par visite, car nous étions limités par la quantité de matériels disponibles.

2.3.3.1 Observations directes

Cette période d'observation s'est concentrée sur les tâches réalisées pendant l'activité de dégivrage d'avions au sein de la nacelle ouverte sans s'intéresser aux autres tâches de maintenance ou d'entretien réalisées par ces mêmes travailleurs. Nous avons également pris note de l'ensemble des informations qui étaient transmises lors des réunions quotidiennes au début du quart de travail entre tous les techniciens du dégivrage d'avions avec leurs responsables d'équipe. Ce moment d'échanges permet par exemple d'annoncer les prévisions météorologiques de la journée, les différents problèmes techniques et organisationnels rencontrés pendant les quarts de travail précédents, ou encore d'attribuer le numéro des camions à chaque travailleur. L'aéroport étudié est une zone très réglementée dans la circulation des personnes. Nous ne sommes donc pas habilités à pouvoir circuler librement sur la zone de dégivrage en dehors des bâtiments du centre de dégivrage qui nous accueillait. Afin d'avoir une observation directe globale des travailleurs en activité, nous nous sommes installés dans la tour de contrôle de l'entreprise de dégivrage. Ce point de vue nous a permis de noter manuellement et chronologiquement, minute par minute les modèles d'avions dégivrés, leurs heures d'arrivée, les produits de dégivrage/antigivrage appliqués, le nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion, la durée nécessaire au dégivrage pour chaque avion ou encore les différentes allées et venues sur la zone de travail.

2.3.3.2 Observations indirectes

D'une part, afin de pouvoir étudier ultérieurement les observations faites depuis la tour de contrôle du centre de dégivrage, nous y avons installé une caméra fixe HD. Cette dernière enregistrait, pendant toute la durée de l'observation et lors de chaque visite, le dégivreur volontaire en activité dans son camion de dégivrage. Nous avons obtenu en moyenne 5h d'enregistrement vidéo pour chaque dégivreur étudié avec cette caméra. Ces enregistrements vidéo ont été recueillis et sauvegardés par l'analyste à l'issue de chacune des journées

d'observation. D'autre part, afin d'avoir une idée précise des activités de dégivrage réalisées au sein de la nacelle ouverte, nous y avons fixé deux caméras portatives (marque Go Pro, modèle HERO 3+ SILVER EDITION). Ces caméras effectuaient des enregistrements vidéo des modes opératoires, des postures et des mouvements des techniciens du dégivrage. Nous les avons fixés sur la structure de la nacelle ouverte de telle manière à avoir un bon visuel du travailleur de dos et de profil. Pour chaque dégivreur étudié et pour chacune des caméras fixées, nous avons obtenu en moyenne 3h30 d'enregistrement vidéo. Afin de faciliter l'analyse des vidéos, nous avons effectué un montage vidéo des trois caméras synchronisées avec le logiciel Vegas pro 13.0 qui permet notamment d'afficher clairement l'heure à laquelle l'enregistrement vidéo a été pris. Nous avons ensuite limité l'analyse des enregistrements vidéo sur environ 1h00 ou 1h30 en continu sur la période d'activité la plus intense lorsque le nombre d'avions dégivrés était le plus important.

2.3.3.3 Codage de l'activité de dégivrage à partir des vidéos

Lors du visionnage des enregistrements vidéo, nous avons décomposé chronologiquement et successivement le déroulement des tâches réalisées pendant l'activité de dégivrage d'avions pour chaque seconde. Nous avons repris le même codage de l'activité que celui établi dans les travaux de (Landau et al., 2017). Ces derniers ont relevé 22 tâches, chacune étant identifiée par un code numérique tel que présenté dans le Tableau 2.2 Liste et code numérique des 22 tâches observables réalisées en nacelles ouvertes tiré de (Landau et al., 2017) Tableau 2.2 :

Tableau 2.2 Liste et code numérique des 22 tâches observables réalisées en nacelles ouvertes tiré de (Landau et al., 2017)

N°	Tâche	N°	Tâche
1	Monter la nacelle en hauteur	12	Ranger la buse de type 4
2	Attendre dans la nacelle	13	Déplacement latéral de la nacelle
3	Tâche indéterminée	14	Entrer dans la nacelle
4	Déplacement du camion (comprend 5 et 6)	15	Quitter la nacelle
5	Avancer le camion (depuis la nacelle)	16	Descendre la nacelle
6	Reculer le camion (depuis la nacelle)	17	Contrôle tactile
7	Asperger de liquide de type 1	18	Contrôle spécial au sol (hors nacelle)
8	Prendre la buse de type 1	19	Contact vocal
9	Ranger la buse de type 1	20	Tâches supplémentaires
10	Asperger de liquide de type 4	21	Contrôle visuel
11	Prendre la buse de type 4	22	Entrer les données sur l'écran de la nacelle

Comme présenté dans les travaux de (Landau et al. 2017), les tâches d'aspersion de liquide de type 1 (n°7), d'aspersion de liquide de type 4 (n°10), de contrôle tactile des surfaces externes des avions (n°17), des contrôles spéciaux au sol pour les avions moteurs queue (n°18), ainsi que de contrôle visuel doublées à celle de déplacement de la nacelle (n°21 + n°4), sont définies comme des tâches effectives. Elles ont donc une contribution directe à assurer la sécurité du décollage de l'avion dégivré. Par ailleurs, les tâches de déplacement de la nacelle (n°1, n°13 & n°16), celles de déplacement du camion depuis la nacelle (n°4, n°5 & n°6), entrer ou quitter la nacelle (n°14 & n°15), contact vocal (n°19), prendre et ranger la buse de type 1 ou de type 4 (n°8, n°9, n°11 & n°12) ainsi que d'entrer les données (volume de liquide asperger) dans le système informatique (n°22), sont caractérisées par (Landau et al., 2017) comme des tâches auxiliaires, n'ayant pas de contribution directe au dégivrage, mais néanmoins elles sont nécessaires. Enfin les tâches d'attente dans la nacelle (n°2), les tâches indéterminées, soit non-visibility sur le champ des vidéo (n°3) ainsi que les tâches supplémentaires, soit non-incluses dans la procédure du dégivrage rédigée par l'entreprise (n°20), sont des tâches n'ayant pas de contribution pour le dégivrage.

Il est important de noter que bien que notre étude ne traite pas de la fatigue cognitive du travail du dégivrage en nacelle ouverte, elles n'ont donc pas été toutes identifiées dans la présente étude au travers l'observation de l'activité. Nous avons malgré tout identifié trois tâches cognitives dans le Tableau 2.2 telles que le contact vocal (n°19), le contrôle visuel (n°21), et l'entrée des données informatiquement (n°22). De plus, ces tâches sont le plus souvent réalisées en même temps (double-tâches) que d'autres tâches identifiées (e.g. : déplacement de la nacelle + contrôle visuel, entrées des données + contact vocal, attendre dans la nacelle + contact vocal). Enfin, certaines tâches physiques peuvent également être réalisées en double-tâches (e.g. : aspersion de liquide + déplacement de la nacelle, contrôle tactile + déplacement de la nacelle).

2.3.3.4 Facteur organisationnel : modèles d'avions dégivrés

L'entreprise de dégivrage étudiée distingue les différents modèles d'avions selon le nombre et la position de leurs moteurs. Voici donc, dans le Tableau 2.3, la liste des avions étudiés et organisés selon les caractéristiques de cette entreprise de dégivrage tiré du rapport de recherche (Nadeau et al., 2017) :

Tableau 2.3 Classification des modèles d'avions dégivrés fournie par l'entreprise de dégivrage tiré de (Nadeau et al., 2017)

Moteurs hélices	Moteurs queue	Moteurs ailes (2)	Moteurs ailes (4)
CRJ2	DH8A	B73H	/
CRJ9	DH8C	B73W	
CL60	DH8D	B736	
E145		B738	
		A320	
		A319	
		A321	
		E170	
		E175	
		E190	

L'observation directe des baies de dégivrage en face de la tour de contrôle de l'entreprise de dégivrage a permis d'assurer une bonne visibilité des participants en activité. Cependant, ces baies ne sont pas suffisamment larges pour accueillir les avions possédant quatre moteurs ailes (e.g. : B747-400 ou C17). Ces types d'avions n'ont donc pas été étudiés dans la présente étude.

Par ailleurs, les procédures de dégivrage prescrite pour un technicien du dégivrage en nacelle ouverte sur les trois types d'avions étudié, ne sont pas les mêmes. En effet, pour les modèles d'avions avec moteurs hélices et les avions avec deux moteurs ailes la procédure est la suivante : déplacement du camion de la zone de sécurité à la baie de dégivrage, déplacement de la nacelle, aspersion de liquide dégivrant, contrôle tactile de l'aile, aspersion de liquide anti-givrant (si nécessaire), déplacement de la nacelle puis déplacement du camion pour rejoindre la zone de sécurité.

La procédure de dégivrage prescrite pour les avions avec moteurs queue est la suivante : déplacement du camion de la zone de sécurité à la baie de dégivrage, déplacement de la nacelle, aspersion de liquide dégivrant, contrôle tactile de l'aile, contrôle spécial au sol, aspersion de liquide anti-givrant (si nécessaire), déplacement de la nacelle puis déplacement du camion pour rejoindre la zone de sécurité.

2.3.4 Recueil de données physiologiques

Les mesures physiologiques ont été réalisées en même temps que la période d'observation et d'enregistrement vidéo, présenté précédemment en 2.3.3.1 et 2.3.3.2, auprès de chaque participant.

2.3.4.1 Équipements

Une mesure des données physiologiques a été effectuée par le biais d'une veste composée de capteurs biométriques. Il existe deux modèles de vestes, un modèle homme et un modèle femme. Cette veste doit être ajustée au corps du participant afin que les électrodes soient en contact direct avec la peau et permettant donc de recueillir des mesures les plus justes possible.

Afin de déterminer la taille adéquate, nous avons donc mesuré le tour de poitrine et la circonférence abdominale de chaque participant puis commandé le nombre de vestes par taille selon notre besoin. Les participants enfilaient la veste au début de leur quart de travail, et rendaient l'équipement à la fin de leur quart de travail ou lorsque l'analyste estimait que la période de mesure était suffisamment longue.

2.3.4.2 Traitement des données

Une fois les mesures effectuées, nous avons utilisé le logiciel HxServices et la plateforme internet d'Hexoskin (<https://www.hexoskin.com/>) afin de récupérer les 5h de données brutes en moyenne par participant. Les variables exploitables fournies par la veste Hexoskin, citées ci-dessous, sont obtenues en moyenne par seconde :

- Temps (en seconde) ;
- Fréquence respiratoire (Nombre de respirations par minute) ;
- Ventilation/min (Volume total d'air inhalé pendant 1 minute) ;
- Fréquence cardiaque (Nombre de battements cardiaques par minute) ;
- Cadence (Nombre de pas par minute).

Comme démontré dans la section 1.5.1.1 de ce mémoire, nous avons fait le choix d'analyser exclusivement l'évolution de la fréquence cardiaque au cours de l'activité de dégivrage en nacelles ouvertes. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux mesures de fréquence cardiaque obtenues pendant toute la durée des enregistrements vidéo et donc exclu les données obtenues en dehors de cette période. Selon les recommandations de (Luczak & Rohmert, 1976) nous avons omis en moyenne les 30 premières minutes de mesures de fréquence cardiaque afin d'écarter les réactions d'adaptation émotionnelle des personnes testées. Nous avons également réalisé un contrôle de la fiabilité des données obtenues, sans identifier de périodes de mesures pendant lesquelles le signal aurait été inexploitable. Enfin, nous avons utilisé le logiciel Excel 2016 en vue d'une synchronisation horaire des mesures de fréquence cardiaque avec le codage des tâches observées pendant les enregistrements vidéo. Les logiciels de traitement statistique

Rstudio 3.3.2 Open source et Excel 2016 nous ont permis de réaliser des analyses approfondies des variables étudiées.

2.3.5 Entrevues semi-dirigées individuelles

Des entrevues individuelles avec chaque participant ont été menées avec l'analyste afin de recueillir des précisions sur la perception du système sociotechnique de la tâche et des exigences au travail, qui n'ont pu être notées pendant la période d'observation du travail. Le questionnaire était composé de 20 questions, auxquelles le participant évaluait pour chacune, le niveau de contrainte sur une échelle de 1 à 5 en étoffant leurs réponses par des exemples vécus. Le questionnaire (*Voir* ANNEXE VIII, Tableau-A VIII-1) était organisé en cinq sections : les objectifs du questionnaire ainsi que quelques questions généralistes, puis les questions relatives à l'organisation du travail, l'évaluation de la charge physique, la charge de travail psychique, avant d'évaluer les contraintes liées aux conditions environnementales. Ces entrevues individuelles étaient menées à l'issue de la période d'observation et des mesures physiologiques afin d'éviter les biais. Celles-ci duraient entre 20 et 30 minutes, pendant la période de travail, en accord avec les responsables de l'entreprise. Aucun enregistrement ni photographie n'ont été pris, seulement des notes prises par l'analyste sur le contenu des réponses des participants. L'analyse des réponses a été réalisée en les recoupant avec les observations, directes et indirectes, faites préalablement par l'analyste, aboutissant à un cadastre de la charge de travail (CDT), selon la méthode de travail développée par (Landau & Rohmert, 1981) (*Voir* ANNEXE IX, Figure-A IX-1 & Tableau-A IX-1).

2.3.6 Recueil de données environnementales

En vue d'estimer la contrainte météorologique effective à laquelle sont exposés les techniciens du dégivrage, deux sources de données ont été consultées telles que celles fournies par l'aéroport ainsi que celles fournies par la station météorologique de l'ÉTS, installée sur le toit du centre de dégivrage.

2.3.6.1 Données météorologiques de l'aéroport

Durant la phase d'observation directe et de prise de mesures physiologiques de chaque participant, l'analyste a pris en note les conditions météorologiques fournies par l'aéroport étudié. Nous avons recueilli les données mises à jour heure par heure des informations suivantes :

- Date / heure ;
- Conditions ;
- Température (°C) ;
- Vitesse du vent (km/h) ;
- Direction du vent ;
- Humidité relative (%) ;
- Point de rosée (°C) ;
- Pression (kPa).
- Visibilité (km)

2.3.6.2 Données issues de la station météorologique de l'ÉTS

Une station météorologique VANTAGE PRO2, fournie par l'ÉTS, a également été installée sur le toit du centre de dégivrage à partir du mois de mars 2017. Nous avons donc, à partir de cette date, recueilli les données fournies par cette station, minute par minute telles que :

- Date / heure ;
- Température (°C) ;
- Humidité relative (%) ;
- Point de rosée (°C) ;
- Vitesse du vent (km/h) ;
- Direction du vent ;
- Refroidissement éolien ;
- Indice de chaleur ;
- Pression (kBar) ;

- Taux de pluie (mm).

2.3.6.3 Regroupement et traitement des données

Comme démontré dans la section 1.3.3.4 de ce mémoire, les variables qui seront considérées plus particulièrement avec ces deux sources de données sont la température extérieure, l'humidité relative, et la vitesse du vent, car ces dernières influent sur le refroidissement éolien. À partir du logiciel Excel 2016, nous avons pu suivre l'évolution au court du temps de ces variables fournies par ces deux sources de données. Par ailleurs, nous avons regroupé les 12 participants selon leurs expositions aux conditions météorologiques pendant le travail, et écarté les participants O1, O11, O4 et O6. Le Tableau 2.4 présente les deux groupes ainsi que la synthèse des conditions météorologiques auxquelles ils étaient exposés et celles des participants soumis au critère d'exclusion.

Tableau 2.4 Regroupement des participants selon les conditions météo et leur sexe tiré de (Nadeau et al., 2017)

	Groupe 1	Groupe 2	Participant ^{es} féminines		Météo exceptionnelle	
	O2, O5, O7, O8	O3, O9, O10, O14	O4	O6	O1	O11
Météo	Neige faible	Dégagé ou nuageux	Neige faible	Dégagé	Dégagé	Nuageux
Visibilité	Entre 1,5 et 5 km	Entre 10 et 24 km	4 km	24 km	24 km	24 km/h
Température	Entre 0°C et -5°C	Entre -2°C et -5°C	0,6°C	1,4°C	-15,5°C	- 10,1°C
Vitesse vent	Entre 9 et 26 km/h	Entre 19 et 37 km/h	20 km/h	12 km/h	30 km/h	27 km/h
Sexe	Homme	Homme	Femme	Femme	Homme	Homme

CHAPITRE 3

IDENTIFICATION OF PHYSICALLY FATIGUING TASKS PERFORMED DURING AIRCRAFT OPEN-BASKET DEICING ACTIVITIES

Le Floch T ^{*1}, Nadeau S ^{*1+2}, Morency F ^{*1}, Landau K ^{*1}

^{*1}Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure,
1 100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, Canada, H3C 1K3

^{*2} Corresponding author: sylvie.nadeau@etsmtl.ca

Article soumis pour publication dans la revue International Journal of Industrial
Ergonomics, le 24 avril 2018

Abstract:

Background:

Airplane deicing technicians work from either an open-basket or closed-basket to make aircraft take-offs safer. A recent qualitative study shows that open-basket technicians express feeling more fatigued than deicing technicians working in closed-baskets.

Objectives:

The objective of this article is to identify the tasks that have an influence on the physical fatigue of open-basket aircraft deicing technicians.

Methodology:

In a Canadian airport during the winter of 2016-2017, a field study was conducted in which we recorded 15h52 of video of 12 volunteer participants and collected their heart rate data. These data were analysed along with the 22 tasks that make up the activity of open-basket aircraft deicing. For each participant, we compared the mean absolute cardiac cost per task. We also characterized the evolution of the cardiac signal based on the resting heart rate and steady state limit, above which the worker enters a state of fatigue.

Results:

During the 15h52m of video recording, the cumulative results of the 12 participants show that their heart rate exceeds the steady state limit for a total of 39 minutes, in a context where the participants are under intense environmental stress. Based on this period of data, the fatiguing tasks appear to be those with an associated heart rate exceeding the steady state limit for the longest period of time. By comparing the mean absolute cardiac costs per task, we were able to identify the fatiguing tasks as being those occurring periodically as well as the double tasks. The most physically fatiguing tasks are spraying deicing and anti-icing fluids, moving the

basket and truck, as well as tactile control and the special ground control (deicing quality control at ground level).

Discussion:

The results of this study were compared and discussed according to the upper limits of the mean absolute cardiac cost as defined in the literature. The results based on the cardiac data were compared to the energy turnover results obtained from the same field study. The present study only considers the physical fatigue of the deicing operatives and does not measure the influence of climatic conditions, emotional stress and individual factors.

Conclusion:

Based on the data produced by this field study, we identified four tasks as having an effect on the level of physical fatigue of open-basket deicing technicians. However, similar studies need to be conducted on the open-basket deicing procedures of other aircraft deicing facilities.

Keywords:

Deicing/anti-icing, aviation safety, ergonomics, heart rate, physical fatigue

3.1 Introduction

On a global scale, civilian air traffic is on the rise (International Air Transport Association, 2016). In North America, this trend was markedly confirmed between 2015 and 2016 according to (International Civil Aviation Organization, 2017) on the international market (+ 3.5% of passengers) and the domestic market (+ 4.9% of passengers). The northern hemisphere is exposed to heavy precipitations and temperatures below 0°C, which increases, for instance, the chances of ice forming on the external surfaces of aircraft (Nadeau & Morency, 2017). The presence of ice on an airplane modifies its aerodynamics and the consequence of this could be fatal at the time of take-off (Brown, 2011). Given this, Canadian legislation (Transport Canada, 2017) makes it mandatory that critical surfaces of aircraft be deiced prior to take-off and that staff be trained in the processes of ground and in-flight aircraft deicing.

Ground deicing activities are performed by deicing technicians who make sure all ice has been completely removed prior to take-off (Sierra et al., 2006). This is done by spraying deicing and anti-icing glycol solvents from deicing trucks, which are driven around the planes and equipped with an open or closed-basket. The health and safety of deicing technicians must also be taken into account. This was made particularly evident in the accident of Royal Air Maroc's

Boeing 747 at Mirabel airport in Montreal, Quebec, Canada in 1995. The accident caused the death of three deicing technicians and injured two others (Canadian Aviation Safety Board, 1995). As mentioned by (Nadeau & Morency, 2017), it is a high-risk sector, which requires that durable solutions be implemented for its workers.

To the best of our knowledge, the ÉREST team is the research team that has conducted and published the most results focussing on human factors engineering for this activity. This is the case for (Torres et al., 2016), who observed the ground deicing activities of 20 deicing technicians and identified thirteen stress factors exerting an influence on work productivity (e.g.: technological, economical, organisational, ergonomic and safety factors). Ground deicing technicians are exposed to several of these factors simultaneously, which leads to combined stress. Moreover, during a qualitative study using the NASA-TLX scale (Torres et al., 2016) demonstrated that deicing technicians perceive their work as being more physically fatiguing when performed in an open rather than closed-basket. Based on these findings (Landau et al., 2017) observed, during a field study in the winter of 2016-2017, 12 open-basket deicing technicians. In their work, (Landau et al., 2017) describe the requirements imposed on deicing technicians and the multiple interactions occurring in the work system of a centralized deicing facility. In addition, during this field study, they identified 22 tasks performed during the open-basket deicing activities. By measuring the level of energy turnover for each task, they established that the overall energy turnover of the workers varied between 4 and 13 kJ/min. For one of the two female participants studied, the energy turnover bordered the recognized upper limit (between 12 and 13 kJ/min for women).

According to the observations of the above-mentioned qualitative and energy turnover studies, the work station of open-basket deicing technicians needs improvement, because as it is, it could be causing fatigue for these workers. To understand the origin of the perceived fatigue, the objective of the present study is to identify the most physically fatiguing tasks that make up open-basket deicing activities.

Our results tell us that the most physically fatiguing tasks in open-basket airplane deicing are: spraying anti-icing and deicing fluids, special ground control, tactile control and moving the basket and truck.

3.2 Methodology

3.2.1 Population and variables studied

The population studied focuses exclusively on open-basket airplane deicing technicians. The work of (Landau et al., 2017) is based on a field study conducted at a Canadian airport during the winter of 2016-2017. They describe the type of population studied, and the conditions of observation of the 12 volunteer participants and open-basket deicing technicians. The personal characteristics of the participants are compiled in Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Mean, maximum and minimum values of the personal characteristics of the participants

Sex	Number	Age (years)			Weight (kg)			Stature (m)		
		Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
Male	10	33	21	54	81.1	68.0	90.7	1.83	1.64	1.95
Female	2	24			56.5	52.0	61.0	1.64	1.57	1.70

The population of open-basket deicing technicians in the facility studied is approximately 50 individuals in full season (between the months of December and March). With a 25% margin of error and a confidence level of 95%, the size of the sample must be 12 participants, at the very least. We therefore have the number of volunteer participants required for this study. To identify the tasks that are physically fatiguing for open-basket deicing technicians, we established that the two variables to be studied are the list of tasks performed during open-basket deicing and the heart rate of the participants.

3.2.2 Data collection

With regards to data collection, on the one hand, the field study conducted by (Landau et al., 2017) provided 15h52m of video recordings of the 12 participants, which correspond to 1 039 registered activities, during the most intensive work periods of open-basket airplane deicing. The work of (Landau et al., 2017) resulted in the breaking down and identifying of the open-basket deicing activity into 22 distinct tasks, as presented in Tableau 3.2.

Tableau 3.2 List and numerical code of the 22, observable open-basket tasks presented in the research of (Landau et al., 2017)

N°	Task	N°	Task
1	Raise basket	12	Put away type-4 spray gun
2	Wait time in basket	13	Move basket laterally
3	Unidentified task	14	Enter basket
4	Drive truck (included 5 and 6 below)	15	Exit basket
5	Advance truck (from within basket)	16	Lower basket
6	Back truck (from within basket)	17	Tactile control
7	Spray type-1 fluid (deicing)	18	Special ground control (outside of basket)
8	Take out type-1 spray gun	19	Radio contact
9	Put away the type-1 spray gun	20	Supplementary tasks
10	Spray type-4 fluid (anti-icing)	21	Visual control
11	Take out type-4 spray gun	22	Enter data on flat screen

The “unidentified tasks” are those that could not be identified using the video recordings, either due to poor visibility or poor viewing angle. The “supplementary tasks” are those performed individually; they are either non-representative of the actual deicing activity, or too rare to base general conclusions for the entire group of participants. The “special ground control” task is performed outside of the basket and is off the camera’s scope, thus it is difficult to analyse precisely this task. The purpose of this task is to verify the quality of the deicing below the wings and wheels of the tail engine plane. Finally, not all the tasks could be clearly coded, such as “radio contact” or “visual control”. Indeed, our video recordings make it difficult to see the faces of the participants. Deicing technicians cover their face to protect it from harsh weather

conditions. This makes the identification of tasks all the more complex. Using the recordings and the identification of these tasks, we divided the deicing activity chronologically at approximately one-second intervals.

It is important to assess the fact that because our study do not address the question of the cognitive fatigue due to the task of deicing in open-basket, the tasks presenting this type of fatigue haven't been identified in their integrality during the observation of the activity. Despite this we did identify three tasks with cognitive fatigue in Tableau 3.2 as the vocal contact (n°19), the visual control (n°21) and the numerical entry of data on the flat-screen (n°22). Moreover, those tasks are most of the time realized simultaneously (double-tasks) compared to other identified tasks (e.g.: moving the basket + visual control, entry of data + vocal contact, waiting in the basket + vocal contact). Finally, some physical tasks might be realized simultaneously as well as double-tasks (e.g.: spray type-1 fluid moving the basket, tactile control + moving the basket).

On the other hand, during the field study with the 12 volunteer participants, all open-basket deicing technicians, we captured in parallel physiological data during the observation period using Hexoskin vests. These vests were adjusted to the size of each participant and worn directly in contact with the skin. The sensors of this vest made it possible to monitor the heart rate over time. As initially observed by (Mueller, 1950), and employed by a good number of other researchers since (e.g.: Meyer, 1996), the heart rate is a reliable variable in the assessment of fatigue. However, as specified by (Rohmert et al., 1973), it must also be taken into account that this variable can be affected by other stress factors other than physical activity such as temperature, mental stress or even other individual characteristics of the participants. In keeping with the recommendations of (Luczak & Rohmert, 1976), we skipped on average the first 30 minutes of heart rate measurements to discard the possible initial emotional adaptive reactions of the test persons. In our case, we will study the evolution of the mean heart rate per second expressed as beats per minute (bpm) over the course of the deicing activity. Then, we temporally synchronized each second of the tasks to the heart rate, for all 12 volunteers.

3.2.3 Data processing

We selected from the literature two methods of data processing to analyse the cardiac signal and ensure the internal validity of the results and their complementarity. To ensure the reliability of our study, these methods of data processing are adapted to the study of a population of workers and make it possible to detect work situations having a high degree of physical constraint.

Firstly, a methodology of cardiac signal analysis similar to that used by (Schlick et al., 2010) was adapted for this study. Given the substantial amount of data captured over the entire period of observation (15h52m), we sought to limit our study to the most physically fatiguing work periods. To do this, we first established, for each participant, the approximate values of the resting heart rate (RHR) before setting the steady state limit (SSL) of the heart rate. (Schlick et al., 2010) mention that when the heart rate of the participant exceeds the steady state limit, the individual is entering a state of fatigue. Using (Schlick et al., 2010) results we calculated each participant's SSL according to the type of resting position, by adding the following heart rate to the RHR: + 35 bpm in sitting position or + 30 bpm in standing position. This enabled us to accurately identify the tasks performed when the heart rate was higher than the steady state heart rate limit.

Secondly, we complemented our cardiac signal analysis methodology with a method initially introduced by (Malchaire, 1988), whose study presents a method of interpreting recordings of the working heart rate according to the cardiac strain, or the absolute cardiac cost (ACC) greater than the resting heart rate, required per task, for the entire group of participants. This variable is the mean amplitude of the heart rate signal greater than the resting heart rate and thus, allowing us to establish the tasks having the heaviest work load. It was calculated at the onset of each task for each individual participant. Then, we compared the ACC greater than the resting heart rate per task before comparing them to the limits of cardiac strain, as proposed by (Frimat et al., 1989), and presented in Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Cardiac strain limits
greater than the resting heart rate as
proposed by (Frimat et al., 1989)

ACC (bpm)	Intensity of work
70 - 60	Intense
60 - 50	Very heavy
50 - 40	Heavy
40 - 30	Rather heavy
30 - 20	Moderate
20 - 10	Light
10 - 0	Very light

Finally, the results of these two methods of statistical analysis were compared to each other and then discussed according to the main objective. Given that few studies specifically analyse the tasks performed in the deicing activity, the results we obtained from analysing the heart rate were compared to the observations in the energy study of (Landau et al., 2017).

3.3 Results

3.3.1 Integration of the cardiac signal limits

For each participant, a graph was generated showing the cardiac signal for the entire deicing activity for each airplane studied. Figure 3.1 shows an example of a graph illustrating the progression of the heart rate signal of an open-basket technician (alphanumeric code O7) during the deicing of a CRJ9 airplane. This particular deicing job lasted 7 minutes and 50 seconds.

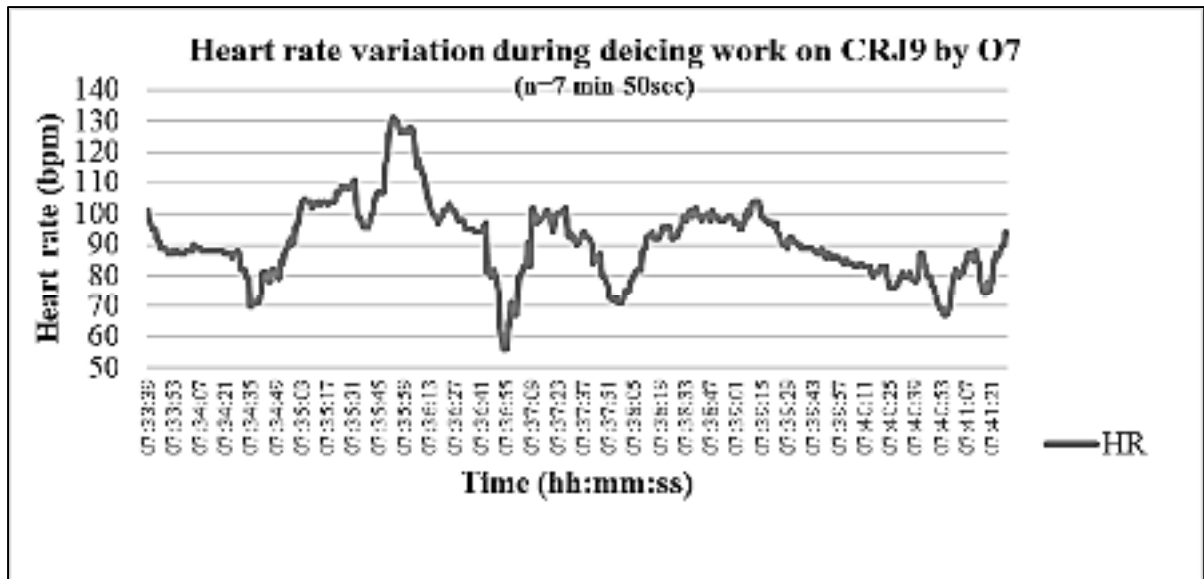


Figure 3.1 Heart rate graph of deicing technician O7, deicing CRJ9 airplane

The mean values of the resting heart rate (RHR) were measured for a sufficient amount of physical resting time (an average of 45 min) while the participants were seated in the cabin of the truck or standing in the open basket. Then, for each participant and based on the RHR, we determined the steady state limit (SSL). The length of the measurements of these cardiac limits is sufficient to enable a margin of absolute error that is between ± 1 bpm and 3 bpm for all 12 participants. The values obtained are presented in detail in Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Resting heart rate (RHR) and steady state (SSL), as well as the absolute error calculated for each of the 12 participants

Participants	RHR (bpm)	SSL (bpm)	Absolute error
O1	62	97	± 1 bpm
O2	84	114	± 2 bpm
O3	75	110	± 1 bpm
O4	71	106	± 3 bpm
O5	86	121	± 1 bpm
O6	69	104	± 1 bpm
O7	64	99	± 2 bpm
O8	68	98	± 1 bpm
O9	77	112	± 1 bpm
O10	74	109	± 1 bpm
O11	64	99	± 1 bpm
O14	79	114	± 1 bpm

3.3.2 Work-period analysis

Each participant underwent continuous observation for periods ranging from 59 to 96 minutes, which amounted to a total of 15h52 for all 12 participants. However, we focused exclusively on the work activities performed while in the open-basket, which for each participant amounted to between 13 and 58 minutes, and in total for all 12 participants 7h12m 16s (or exactly 25 936s).

Moreover, once the resting heart rate and steady state limits were established, we were able to measure the length of time during which the heart rate exceeded both limits respectively. To do this, we expressed in percentages the length of time during which the heart rate was greater than the steady state limit (SSL) and resting heart rate (RHR), over the total length of the time measured in open-basket only. Tableau 3.5 shows the percentage of mean length of time during which the heart rate of the 12 participants is greater than the RHR and SSL, as well as the standard deviation and margin of error of this mean.

Tableau 3.5 Results in percentages of time during which the heart rate for all participants is greater than the RHR and SSL

	Mean	Standard deviation	Margin of error
% of time that HR > RHR	89.7%	10.4%	3.47%
% of time that HR > SSL	10.3%	11.3%	6.26%

Tableau 3.5 indicates that the heart rate of the 12 participants exceeds the resting heart rate during an average of 89.7% of the work time in the open-basket. The heart rate of the 12 participants exceeds the steady state limit (SSL) 10.3% of the time on average (that is, exactly 2 397 seconds \pm 6.26%) of the total work time in open-basket.

3.3.3 Identification of tasks during which HR is greater than SSL

We analysed the periods during which the heart rate of the 12 active deicing technicians was greater than the SSL, which translates to 2 397 seconds. We identified the duration (in seconds) of the various tasks performed during these 2 397 seconds and illustrated the results in Figure 3.2.

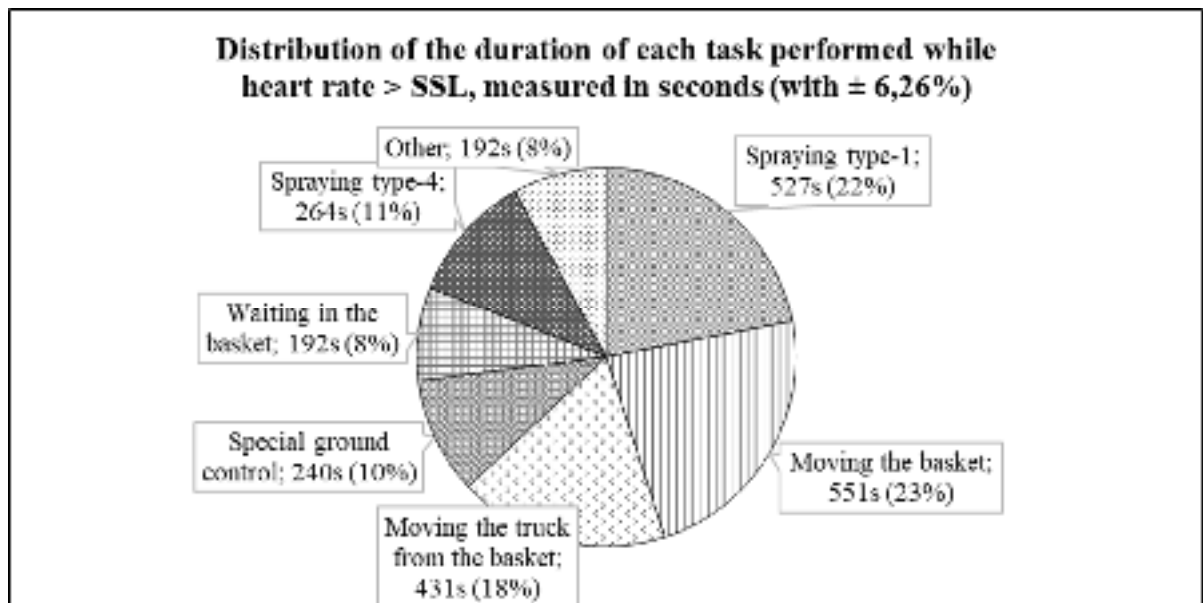


Figure 3.2 Distribution of tasks for which the heart rate is greater than SSL, expressed in seconds (heart rate of 12 participants > SSL during n = 2 397 seconds)

It should be noted that the “Waiting in basket” period is rarely a time of passive waiting. The participants will for instance adjust their clothing, or perform tasks hard to distinguish on the video, such as listen to their headset radio communication or conduct visual controls.

Also, by taking into account our margin of error as presented in Tableau 3.5, we observe based on Figure 3.2, that the activities for which the heart rate of all the participants is greater than the SSL most of the time, are the following: spraying type-1 during 527 seconds (8min 47s ; $\pm 6.26\%$), moving the basket during 551 seconds (9 min 11s; $\pm 6.26\%$) and driving the truck using the basket controls during 431 seconds (7 min 11s ; $\pm 6.26\%$). The other tasks occur during less than 264 seconds, or 4 min 24s; $\pm 6.26\%$ of the time. Indeed, the category “Other” includes a set of tasks lasting a total of 192 seconds (or 3m 12s; $\pm 6.26\%$). These are tasks that seldom occur and when they do, it is for very short periods of time.

3.3.4 Measurement of the absolute cardiac cost per task

To complement these results, we calculated the mean absolute cardiac cost per task measured using the RHR for the 12 participants during 7h 12m 16s (or 25 936s) of data, the results of which are presented in Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Comparison of the mean absolute cardiac costs for open-basket deicing tasks, based on the limit of cardiac strain according to (Frimat et al., 1989) (on n = 25 936s of data analysed for the 12 participants)

Limit of cardiac strain (bpm)	Average ACC (bpm) \pm 2 bpm	Tasks
Heavy (from 40 to 50)	40.6	Spraying type-4 + Lowering basket
Rather heavy (from 30 to 40)	37.0	Lowering basket + Tactile control
	37.0	Lowering basket + Radio contact
	36.8	Entering the basket
	34.9	Special ground control (outside of basket)
	33.9	Raising the basket + Moving basket laterally
	31.0	Raising the basket + Visual control
	30.7	Visual control
	30.5	Putting away type-1 spray gun + Moving basket laterally
Moderate (from 20 to 30)	28.9	Exiting the basket
	25.8	Moving the truck (includes 5 and 6)
	25.3	Spraying type-4 fluid
	25.1	Spraying type-1 fluid
	24.8	Taking type-4 spray gun
	24.6	Putting away type-4 spray gun
	24.4	Taking type-1 spray gun
	24.4	Lowering basket + Entering data using basket's flat screen
	24.2	Spraying type-4 fluid + Moving basket laterally
	24.0	Putting away type-1 spray gun
	23.8	Backing the truck (remotely, from basket)
	23.7	Raising the basket
	22.7	Radio contact
	22.4	Waiting in the basket
	22.2	Advancing the truck (from the basket)
	21.7	Supplementary tasks
	21.7	Tactile control
	21.2	Exiting basket
	21.1	Unidentified tasks
Light (from 10 to 20)	19.8	Entering data using the basket's flat screen
	19.6	Raise basket + taking type-1 spray gun
	19.2	Moving basket laterally
	18.3	Spraying type-1 fluid + Moving basket laterally
	16.8	Moving basket laterally + Taking type-1 spray gun
	15.2	Moving basket laterally + Lowering basket
	12.4	Moving basket laterally + Radio contact

It seems that the tasks having the highest mean absolute cardiac cost are those that are performed simultaneously with another task. In fact, the double task of “Spraying type-4 fluid + Lowering the basket” is the task for which the cardiac strain required is the greatest for the entire population of deicing technicians studied, with an absolute error of approximately ± 2 bpm.

3.4 Discussion

Currently, open-basket deicing technicians feel they are more physically fatigued after their work day than closed-basket deicing technicians are (Torres et al., 2016). No other work has published analyses of the cardiac signal of open-basket deicing technicians in view of identifying the most physically fatiguing tasks. The present study made it possible to identify these tasks as: spraying anti-icing/deicing fluids, moving the basket and truck, tactile control, ground control and tasks performed simultaneously with other tasks.

The time constraint and number of participants are major limitations to the collection of data in the field study. Indeed, deicing is a seasonal activity and the work environment of open-basket deicing technicians is affected by, among other things, highly fluctuating meteorological conditions. It is difficult to anticipate when deicing will be needed and to target the most fatiguing work in open-baskets. This is the main reason why we limited our study to 12 participants, given that this was a sufficient number to ensure significative results, however it would have been good to have observed more test persons to lower the margin of error. The work environment of open-basket deicing technicians involves multiple stress factors that appear quite randomly (Torres et al., 2016). Each measurement period of the participants depended on these factors, affecting the effectiveness of their work, and consequently, affecting the experimental data. Our work focused on studying the physical load on the heart rate. However, it must also be taken into account that the heart rate may be affected by other stress factors other than physical activity, such as temperature, mental stress, dehydration or even the individual characteristics of the participants (Schlick et al., 2010). Thus, in light of the significant number of stress factors, which are constantly varying, and in light of the limited

number of participants, it could be possible that those other variables (e.g. weather, time of day, weekday, aircraft type and others) have a greater influence on the heart rate than the physical fatigue. Furthermore, this study encountered technical limitations. Given that the video recordings show the tasks performed from within the basket, all the tasks performed outside the basket were difficult to identify and analyse. In fact, certain tasks were difficult to clearly see and identify, due to the position of the cameras and the limited size of the basket. Given these circumstances, it would be relevant to conduct new studies for open-basket airplane deicing. Other studies could analyse respiratory data or the cardiac variability of the 12 study participants of (Landau et al., 2017). Still, more studies similar to this one should also be conducted at other airport deicing facilities to compare our results.

The first results obtained using the methodology similar to that of (Schlick et al., 2010), enabled us to identify the various tasks performed when the heart rate exceeded the heart rate's steady state limit. However, (Schlick et al., 2010) specify that these limits are only indicators and that they depend on multiple factors (e.g. temperature, mental stress, dehydration or individual characteristics). Furthermore, it is difficult to compare the duration of these activities with each other, given that this depends on how frequently they occur. For example, "Spraying type-4 fluid" or even "Special ground control" tasks are performed less frequently and for shorter lengths of time than "Spraying type-1 fluid", because they are performed in different meteorological and organisational conditions. To verify the internal validity of our results, we chose to complement our initial results with a study of the mean absolute cardiac cost, per task. We compared these results to the absolute limit of cardiac strain as defined in the literature by (Frimat et al., 1989). We observed that the tasks for which the work load was qualified as "rather heavy" or "heavy" according to the literature, are primarily those described as double tasks. These intense tasks occur occasionally but have a high and prompt absolute cardiac cost. However, the absolute margin of error of these results being ± 2 bpm, the hierarchization of these tasks among themselves is not strict. Thus, these results do not make it possible for us to identify the cumulative effect of fatiguing tasks, when these are performed consecutively.

Finally, we also compared our conclusions with the results of the energy study of (Landau et al., 2017), based on the same participants. The latter indicate that the tasks of special ground control and entering/exiting the basket are the most energy expensive tasks in the adopted posture (10 kJ/min) but involve some light hand work (between 1,75 and 3,25 kJ/min). The tasks of spraying deicing and anti-icing fluids are also energy expensive (4 kJ/min) and it requires that deicing technicians work with their entire body (21 kJ/min). Our results allow us to confirm (Landau et al., 2017) results, as well as identify other fatiguing tasks such as tactile control and moving the basket and truck. Differences across these studies could be attributed to the effect of the multiplicity of the stress factors on the cardiac signal, and the cumulative effect of the fatigue.

3.5 Conclusion

In answer to the initial objective set for this study, we can assert that our results compared to those in the literature make it possible for us to establish that the tasks causing the open-basket deicing technicians the most physical fatigue are the following single or double tasks:

- Spraying deicing/anti-icing fluids;
- Special ground control;
- Tactile control;
- Moving the basket and truck.

The identification of fatiguing tasks may help deicing companies and airports to plan their areas of improvement for the processes of open-basket deicing, to help reduce the physical fatigue of their workers. In future studies, based on the other nine physiological variables collected from the participants during this field study, it would be relevant to study the evolution of the cardiac variability or other respiratory data. Also, more studies similar to this one should be conducted in other airports.

3.6 Acknowledgments

The authors would like to thank École de technologie supérieure and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada for their funding support as well as the partner deicing company and its workers for their participation.

3.7 References

- Brown, A. P. (2011). Aircraft performance degradation - The effects of inflight icing upon lift, drag and propulsive efficiency. *SAE Technical Papers*. doi: 10.4271/2011-38-0073
- Canadian Aviation Safety Board. (1995). Rapport d'enquête sur accident aéronautique : collision avec un véhicule Royal Air Maroc, boeing 747-400 CN-RGA aéroport international de Montréal à Mirabel (Québec) 21 janvier 1995. (pp. 58): Bureau de la sécurité des transports du Canada.
- Frimat, P., Chamoux A., De Gaudemaris, R., Cantinaux, A., Amphoux, M. (1989). Heart rate and work. What use? What criteria? *I.N.R.S Archives des maladies professionnelles* 50(4) : 357-360.
- International Air Transport Association. (2016). Passenger Demand Growth Slows. *Press Release No.: 24*. from <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-06-30-02.aspx>
- International Civil Aviation Organization. (2017). Croissance du trafic et rentabilité : points saillants du transport aérien en 2016. from <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/traffic-growth-and-airline-profitability-were-highlights-of-air-transport-in-2016.aspx>
- Landau, K., Nadeau, S., Le Floch, T., Morency, F. (2017). Ergonomic Time and Motion Studies of Aircraft De-icing Work. *Journal of Ergonomics* 7(204). doi: 10.4172/2165-7556.1000204
- Luczak, H., & Rohmert, W. (1976). Anpassungsreaktion von Arbeitspersonen bei ergonomischen Feldstudien informatorischer Arbeitsinhalte. *European Journal of Applied Physiology*, 35(1), 31-47. doi: 10.1007/BF00444655
- Malchaire, J. (1988). Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. *Cah. Méd. Trav.*, Vol XXV(4), 181-186.

- Meyer, J. P. (1996). La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une métrologie moderne. *I.N.R.S Documents pour le médecin du travail*, TL 20, 68, 315-322.
- Mueller, E. A. (1950). Ein Leistungspulsindex als Mass der Leistungsfähigkeit. *Arbeitsphysiologie*, 14, 271-284.
- Nadeau, S., & Morency, F. (2017). De-icing of aircraft: Incorporating business risks and occupational health and safety. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 7(2), 247-266. doi: 10.2495/SAFE-V7-N2-247-266
- Nadeau, S., Salmanzadeh, H., Ahmadi, M., Landau, K. (2018). Aviation Deicing Workers, Global Risk Assessment of Musculoskeletal Injuries. Soumis (Jan) *International Journal of Industrial Ergonomics*.
- Rohmert, W., Laurig, W., Philipp, U., & Luczak, H. (1973). Heart rate variability and workload measurement. *Ergonomics*, 16(1), 33-44. doi: 10.1080/00140137308924480
- Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2010). Arbeitswissenschaft (pp. 276-281). Heidelberg / Dordrecht / London / New York: Springer.
- Sierra, E. A., Bender, K., Marcil, I., D'Avirro, J., Pugacz, E., & Eyre, F. (2006). *Human Visual and Tactile Ice Detection Capabilities under Aircraft Post Deicing Conditions*. (DOT/FAA/TC-06/21). from <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc06-21.pdf>.
- Torres, Y., Nadeau, S., & Morency, F. (2016). Study of fatigue and workload among aircraft de-icing technicians. *Occupational Ergonomics*, 13(2), 79-90. doi : 10.3233/OER-160240
- Transports Canada. (2015). *Partie VI – Règles générales d'utilisation de vol des aéronefs*. Opérations dans des conditions de givrage au sol. Norme 622.11 (1) à (7). Repéré à <http://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/servreg/rac/partie6-normes-norme622-513.htm>

CHAPITRE 4

ANALYSES COMPLEMENTAIRES

D'autres analyses de l'activité de dégivrage en nacelles ouvertes ont été menées à partir de la fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage, afin de répondre aux hypothèses 2 et 3. Celles-ci ne sont pas incluses dans l'article du CHAPITRE 3 et par ailleurs n'ont pas été publiées car les résultats n'étaient pas suffisamment significatifs.

4.1 Influence des facteurs de stress ergonomiques et sécuritaires

Pour rappel de la partie 1.7, l'hypothèse 2 est la suivante : les facteurs de stress ergonomiques et sécuritaires relatifs au nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion, aux modèles d'avions dégivrés, et aux conditions météorologiques ont une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes.

4.1.1 Nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion

Les variables étudiées dans cette sous partie sont :

- Le nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion ;
- La fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes.

Nous avons étudié spécifiquement les périodes de données cardiaques des 12 techniciens en nacelles ouvertes, lorsque la limite cardiaque à l'équilibre (SSL) était dépassée, soit durant 39 minutes (ou 2 397 secondes). Nous avons regroupé les 75 avions dégivrés en quatre groupes, selon le nombre de techniciens affectés par avion qui peut être de deux, trois, quatre ou cinq techniciens du dégivrage, en nacelles ouvertes et fermées confondues. Ensuite, nous avons calculé pour chaque avion, le pourcentage du temps pendant lequel la fréquence cardiaque était supérieure à la limite cardiaque à l'équilibre, avant de calculer la médiane de ce pourcentage de temps pour chaque groupe. Enfin, nous avons estimé la marge d'erreur (*Voir* ANNEXE X,

Tableau-A X-1) à la médiane de chaque groupe. La Figure 4.1 illustre graphiquement le résultat de cette étude.

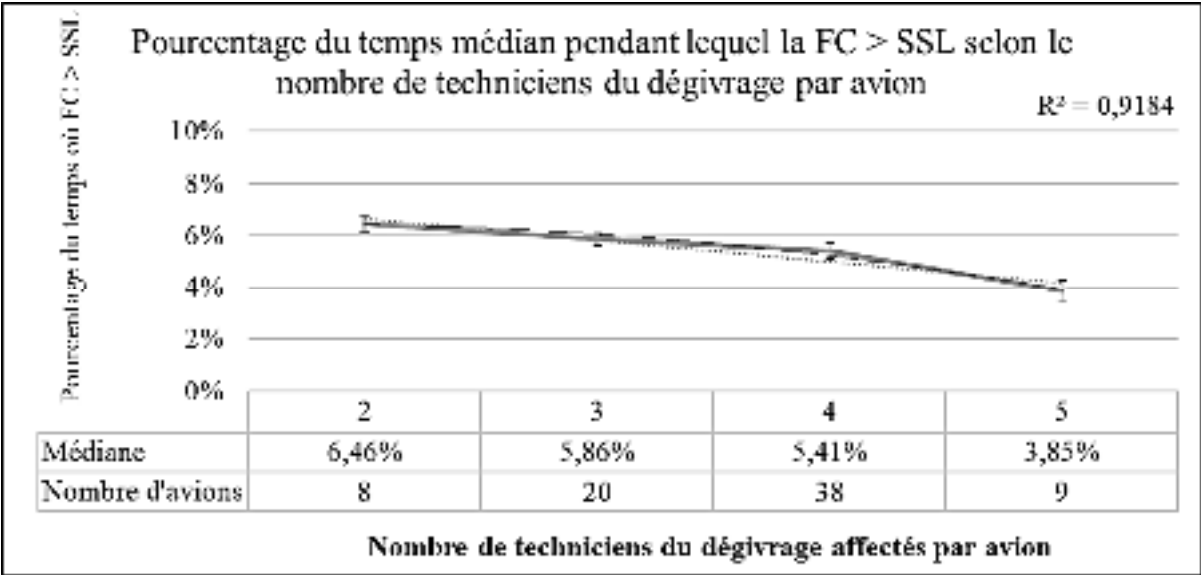


Figure 4.1 Distribution du pourcentage de temps médian pendant lequel la fréquence cardiaque est supérieure à la SSL selon le nombre de techniciens du dégivrage par avion adaptée de (Nadeau et al., 2017)

A partir de la Figure 4.1, nous constatons qu’il y a une tendance selon laquelle plus le nombre de techniciens du dégivrage affectés par avion est important, moins longtemps la fréquence cardiaque (FC) des techniciens en nacelles ouvertes dépasse la limite à l’équilibre (SSL). En effet, le coefficient de droite linéaire (R^2) est d’environ 0,92, avec des marges d’erreur relativement faibles (entre 0,24% et 0,43% du temps où $FC > SSL$). Nos résultats sont donc significatifs. De plus, le dégivrage des avions est principalement effectué par quatre techniciens du dégivrage par avion (dans 38 cas sur 75) et moins fréquemment par deux techniciens du dégivrage par avion (huit cas sur 75).

Nous pouvons constater que le nombre de techniciens du dégivrage influence la fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. En effet, ce graphique en Figure 4.1 illustre l’effet de planification des effectifs mise en place par l’entreprise de dégivrage partenaire. En effet, les techniciens du dégivrage en activité sont plus fatigués

physiquement lorsqu'ils dégivrent un avion à deux techniciens qu'à cinq. Le système de planification des effectifs sur appel en place actuellement peut être amélioré. Cependant, nous pouvons modérer l'influence de ce facteur de stress, car l'écart entre les médianes calculées avec cinq techniciens du dégivrage et deux techniciens est de seulement de $\Delta = 2,62\%$ du temps où la fréquence cardiaque est supérieure à la SSL. Cette étude est intéressante pour l'entreprise partenaire, car nous leur permettons d'avoir une vérification externe de l'effet de leur système de planification des effectifs sur la fatigue des travailleurs. De plus, nous recommandons à l'entreprise d'améliorer leur système de planification des effectifs notamment pour les avions actuellement dégivrés par deux ou trois techniciens. Enfin, nous suggérons de mener de nouvelles études dans le futur sur l'effet de la planification des effectifs sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage, auprès d'autres centres de dégivrage centralisés, adoptant une organisation du travail différente.

4.1.2 Conditions météorologiques et modèles d'avions

Les variables étudiées dans cette sous partie sont :

- Les conditions météorologiques ;
- Les modèles d'avions dégivrés ;
- La fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes.

4.1.2.1 Validité des données météorologiques

Dans cette étude, telle que précédemment présenté en partie 2.3.6.3, nous avons cherché à mesurer l'influence météorologique, s'il y en avait une, et d'écarter les participants exposés à des conditions météorologiques extrêmes le jour de la mesure ainsi que les participantes féminines. En effet, nous avons dû écarter les deux participants dont les conditions météorologiques n'étaient comparables à aucune autre journée de mesure. Ces journées exceptionnelles n'étaient pas en nombre suffisant pour que nous puissions les étudier. De plus, les conditions météorologiques des deux participantes féminines étaient comparables aux autres participants masculins, mais leur fréquence cardiaque était nettement plus élevée

comparée à celle des hommes, ce qui a une influence sur le résultat final. Nous avons donc étudié la fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage des groupes 1 et 2 tels que :

- Groupe 1 : O2, O5, O7, O8 ;
- Groupe 2 : O3, O9, O10, O14.

Or, pour réaliser ce regroupement, nous avons étudié les données météorologiques issues de la station météorologique de l'aéroport, comme détaillé en partie 2.3.6.1. Afin de nous assurer de la validité interne et de la représentativité de ces mesures, nous les avons comparées avec les données météorologiques issues d'une station météo propriété de l'ÉTS et placée plus près des baies de dégivrage (sur le toit du bâtiment principal du centre de dégivrage à une hauteur de 15m du sol environ), du même aéroport, comme présenté en partie 2.3.6.2, avec deux participants, O4 et O6.

Comme rappelé en partie 1.3.3.4, la littérature caractérise le refroidissement éolien selon la température extérieure et la vitesse du vent. La Figure 4.2 et la Figure 4.3 illustrent l'évolution de la température extérieure pour les deux participants, O4 et O6, pendant toute la durée de la mesure pour chacune des deux sources de mesures.

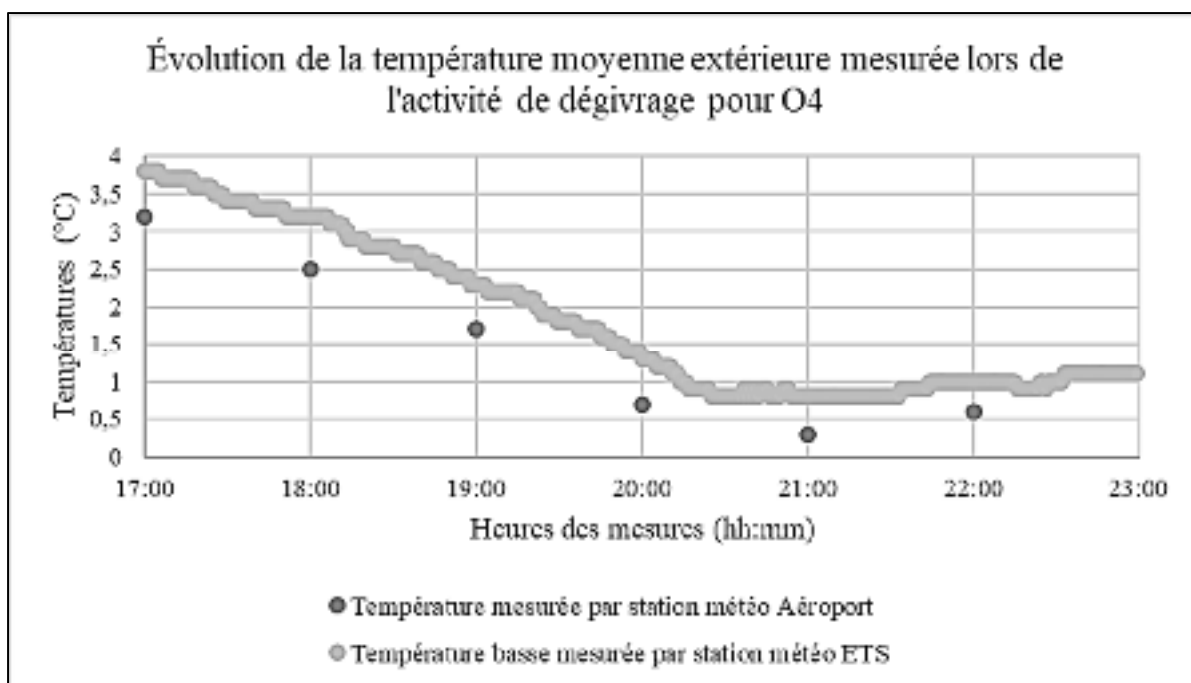


Figure 4.2 Représentation graphique de la température moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O4 tirée de (Nadeau et al., 2017)

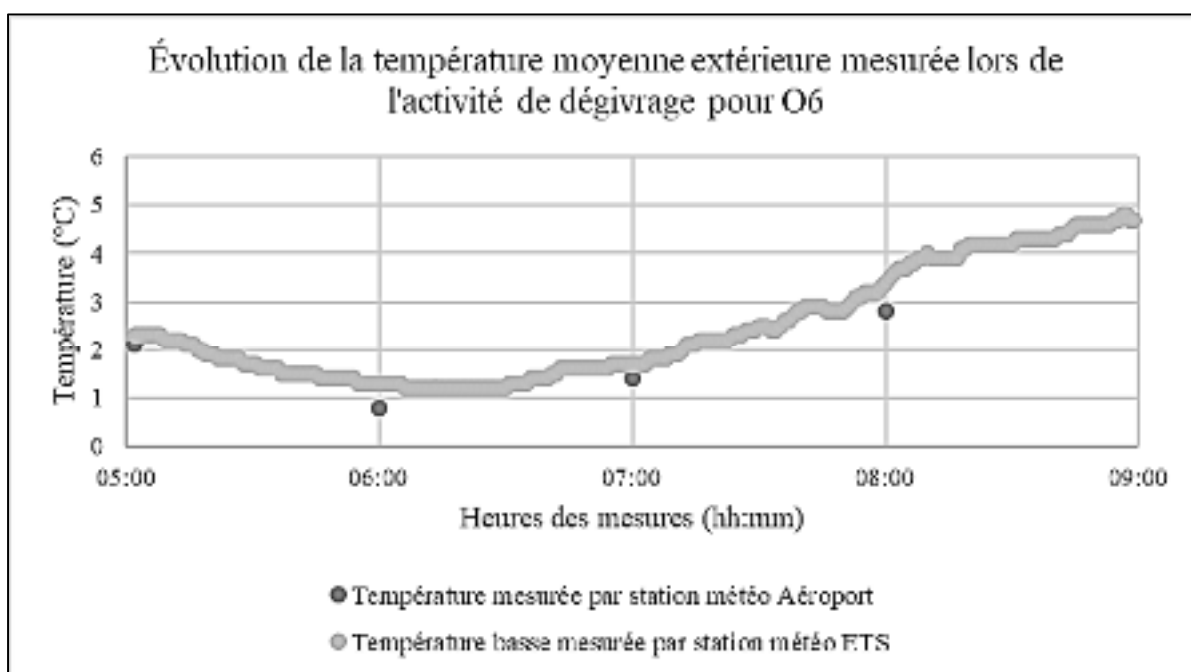


Figure 4.3 Représentation graphique de la température moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O6 tirée de (Nadeau et al., 2017)

La Figure 4.4 et la Figure 4.5 illustrent l'évolution de la vitesse du vent pour les deux participants, O4 et O6, pendant toute la durée de la mesure pour chacune des deux sources de mesures.

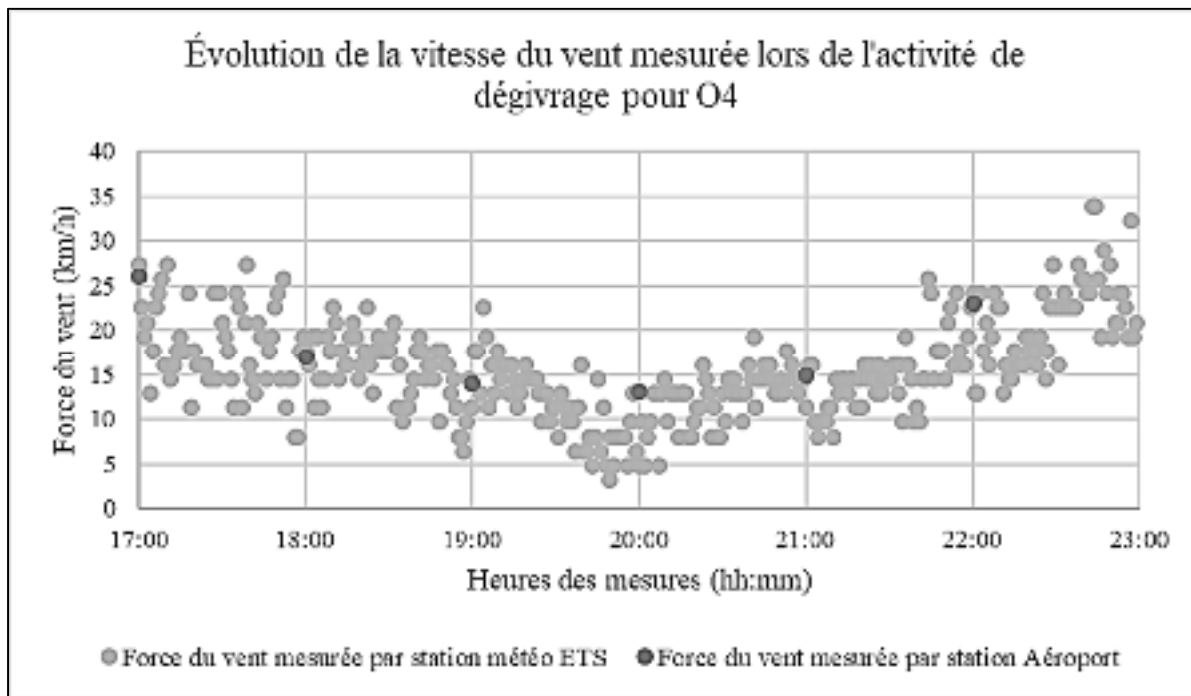


Figure 4.4 Représentation graphique de la vitesse du vent moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O4 tirée de (Nadeau et al., 2017)

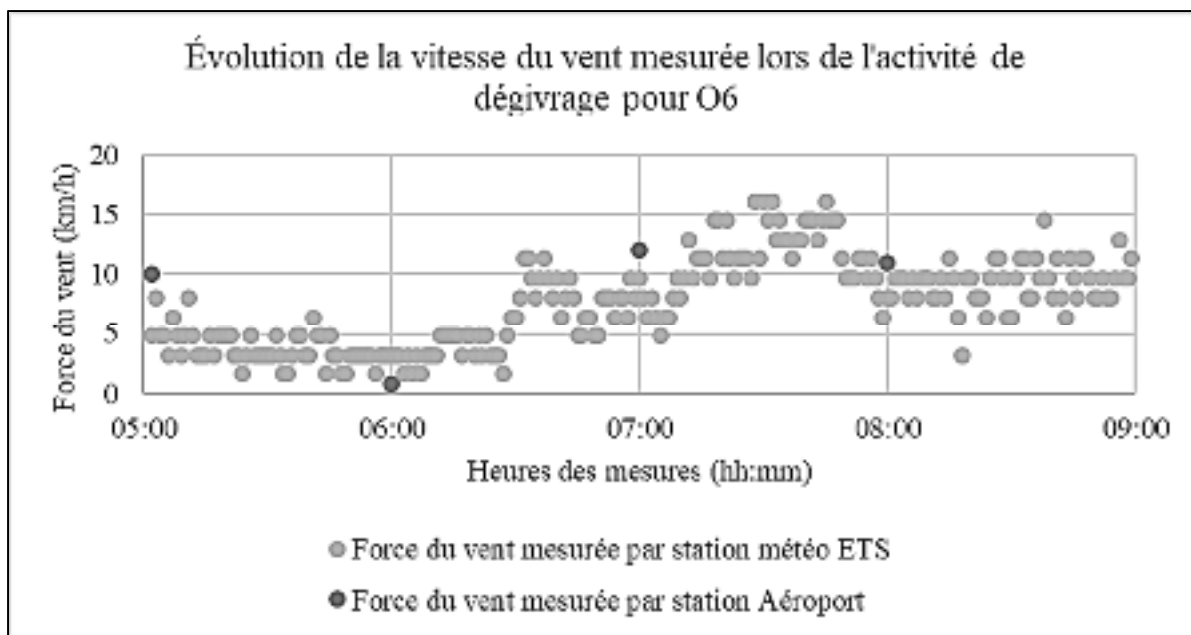


Figure 4.5 Représentation graphique de la vitesse du vent moyenne mesurée pendant la durée du dégivrage pour O6 tirée de (Nadeau et al., 2017)

A partir de la Figure 4.2 à la Figure 4.5, nous constatons que la station météo de l'ÉTS met à jour les mesures météorologiques chaque minute alors que la station de l'aéroport les met à jour chaque heure. Concernant les mesures de la température extérieure, observables en Figure 4.2 et Figure 4.3, nous pouvons remarquer que l'écart entre les mesures faites avec la station météo de l'aéroport et celles de la station de l'ÉTS n'est pas le même lors des deux sessions de mesures. En effet, avec le participant O4 l'écart entre les deux sources de mesure est entre $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ et $0,4^{\circ}\text{C}$, alors qu'avec le participant O6 cet écart est entre $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ et $0,2^{\circ}\text{C}$. Par ailleurs, nous pouvons remarquer à partir de la Figure 4.4 et Figure 4.5, que globalement les mesures horaires obtenues à partir de la station météo de l'aéroport suivent les mêmes tendances que les mesures minute par minute de la station météo de l'ÉTS. Cependant, nous pouvons également constater graphiquement qu'il y a une grande variabilité quasiment instantanée dans les mesures de la vitesse du vent depuis la station de l'ÉTS d'une minute à une autre avec un écart de $\pm 10 \text{ km/h}$, et avec les données horaires issues de la station de l'aéroport un écart de $\pm 5 \text{ km/h}$. Finalement, nous constatons que la comparaison des mesures de la station météo de l'ÉTS avec les données météorologiques de l'aéroport indique une

excellente corrélation, et nous conforte dans le choix de l'étude des données météorologiques mesurées par l'aéroport pour les dix autres participants à cette étude. De plus, pour répondre à notre hypothèse 2, nous nous sommes appuyés sur les constatations établies dans le rapport de recherche rédigé pour l'entreprise de dégivrage partenaire (Nadeau et al., 2017). En effet, nous constatons qu'à partir de la classification du refroidissement éolien précédemment présentée en 1.3.3.4 (CNESST, 2011), les fluctuations mesurées dans la température extérieure et la vitesse du vent ne sont pas suffisantes pour avoir un impact sur le risque d'engelure.

Cependant, il est difficile de conclure sur l'influence des conditions météorologiques sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes à partir de ces deux sessions de mesures, car elles ont permis de synchroniser les deux sources de données entre elles, sur seulement dix points de mesure. Afin de mesurer significativement la différence météorologique entre le point de mesure de l'aéroport et celui de l'entreprise de dégivrage, nous recommandons donc de procéder à de nouvelles mesures. En effet, ces mesures devront être prises en plus grand nombre sur une période de mesures plus étendue, et ceci dans différentes conditions météorologiques.

Il aurait également été intéressant de connaître exactement les conditions météorologiques telles qu'elles sont ressenties par les participants sur les baies de dégivrage. Les mesures réalisées sur le toit de l'entreprise de dégivrage ont pu être influencées par différents facteurs extérieurs (e.g. : libération de chaleur par le toit du bâtiment ou due à la proximité d'une bouche d'évacuation de vapeur). Mais dans un souci logistique (difficulté pour fixer la station météo de l'ÉTS sur la nacelle) ainsi que de géolocalisation, l'entreprise partenaire a dû se résigner à positionner celle-ci fixement sur le toit de leur bâtiment principal. Afin de compléter la mesure d'impact météorologique, nous recommandons donc de procéder à une nouvelle campagne de mesures en plaçant la station météorologique plus proche des baies de dégivrage et éloignée des bâtiments (e.g. : sur les poteaux d'éclairage situés sur les baies).

4.1.2.2 Modèles d'avions

Dans la partie 1.3.4, nous avons présenté les constatations établies dans les études précédentes telles que certains modèles d'avions posent davantage de problèmes à dégivrer que d'autres modèles. Nous avons donc étudié les variations cardiaques des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes selon les modèles d'avions dégivrés. Afin de bien mesurer l'effet des modèles d'avions sur une potentielle variation de la fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage, nous avons différencié les participants étudiés selon leurs conditions météorologiques ainsi que leur genre. Les données météorologiques sont celles recueillies à partir de la station de l'aéroport et précédemment démontrées comme étant valides en partie 4.1.3.1. Les deux conditions météorologiques étudiées sont les chutes de neige et les conditions nuageuses. En effet, les données météorologiques fournies par l'aéroport indiquent la visibilité (en km) ainsi que les conditions (e.g. : neige, nuage ou ensoleillé). A partir de ces données, nous avons regroupé en deux groupes, les données issues des huit participants hommes étudiées dans cette hypothèse tels que :

- Groupe 1 : (hommes, chute de neige) O2, O5, O7, O8 ;
- Groupe 2 : (hommes, temps nuageux) O3, O9, O10, O14.

Nous avons étudié spécifiquement les périodes de données cardiaques des huit techniciens en nacelles ouvertes, en pourcentage du temps pendant lequel la limite cardiaque à l'équilibre (SSL) était dépassée soit durant 1 153 secondes, sur la durée de dégivrage de chaque avion (51 avions étudiés en tout). Puis nous avons comparé ces résultats en fonction de la classification des modèles d'avions établie selon le nombre et la position des moteurs sur ces avions, présentée en 2.3.3.4. Ensuite, nous avons calculé, par catégorie d'avions, le pourcentage médian du temps pendant lequel la fréquence cardiaque était supérieure à la limite cardiaque à l'équilibre. Enfin, nous avons estimé la marge d'erreur (*Voir* ANNEXE X, Tableau-A X-2) par avion à la médiane de chaque groupe. La Figure 4.6 montre graphiquement le résultat de cette étude.

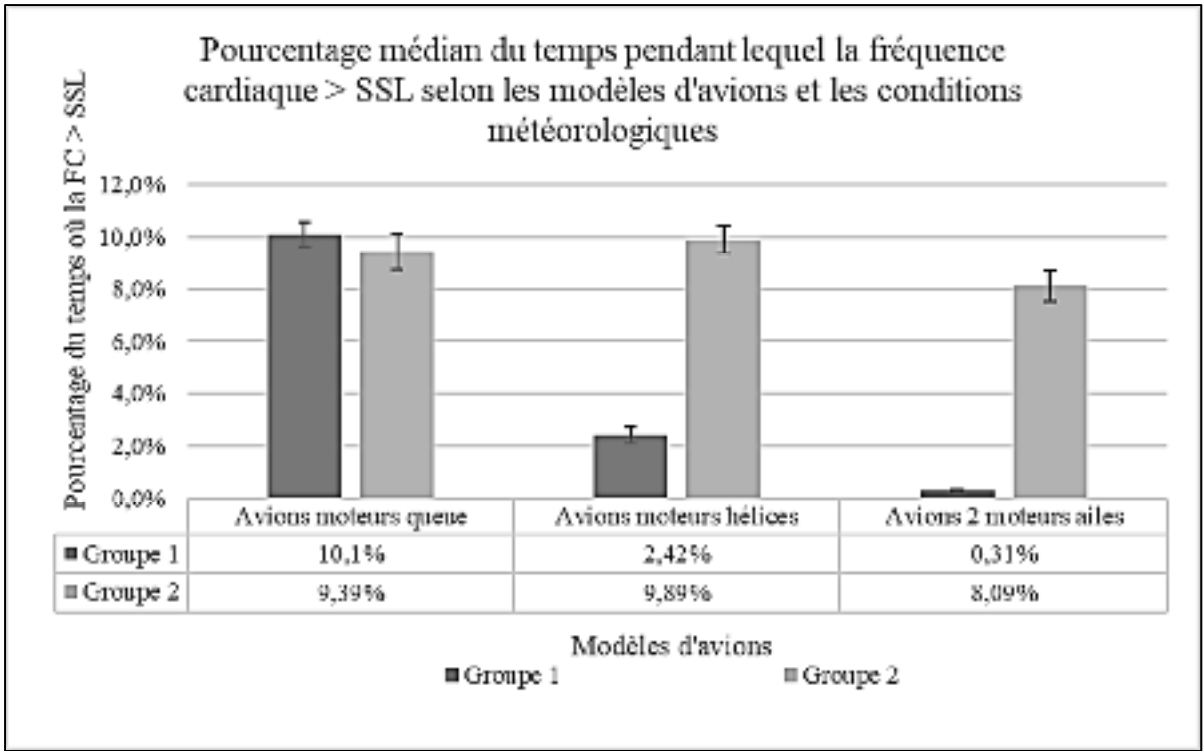


Figure 4.6 Distribution du pourcentage du temps médian pendant lequel la fréquence cardiaque est supérieure à la SSL selon les modèles d’avions et les conditions météorologiques, adaptée de (Le Floch et al., 2018)

A partir de la Figure 4.6, nous constatons que la fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage a été plus longtemps supérieure à la SSL dans le cas du groupe 2 que dans celui du groupe 1 (673s vs 480s). Ensuite, nous pouvons constater que dans les deux conditions météo présentées, la fréquence cardiaque des techniciens du dégivrage en charge des avions à moteurs queue, était environ 10% du temps au-dessus de la SSL. Or, les avions moteurs queue sont aussi ceux sur lesquels les tâches de « contrôle spécial au sol » à savoir le contrôle de la qualité du dégivrage au sol, sont effectuées. Et comme démontré dans le CHAPITRE 3 de ce mémoire ainsi que dans le rapport technique de (Torres, 2014), il s’agit d’une tâche fatigante.

L’écart entre les valeurs des deux groupes présentés en Figure 4.6 pour les avions à moteurs hélices et les avions à deux moteurs ailes ne nous permet pas de conclure sur une corrélation entre type d’avion et temps de dépassement de la SSL. En effet, le groupe 2 présente un pourcentage de temps où la FC > SSL est quatre fois plus élevé que celui du groupe 1 pour les

avions à moteurs hélices et 26 fois plus élevé pour les avions à deux moteurs ailes. Nous ne pouvons donc pas généraliser à tout le groupe de participants et à la population de techniciens du dégivrage, que les modèles d'avions dégivrés ont une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. Pour pouvoir répondre à notre hypothèse, nous recommandons malgré tout pour les études futures, de procéder à de nouvelles campagnes de mesures sur un nombre suffisant d'avions auprès d'un nombre suffisant de techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes dans d'autres conditions météorologiques, semblables entre-elles. Il serait également pertinent d'étendre cette étude au sein d'autres centres de dégivrage ailleurs dans l'hémisphère nord, soumis à des conditions météorologiques différentes.

4.2 Durée de récupération cardiaque

Pour rappel de la partie 1.7, l'hypothèse 3 est la suivante : lorsque l'activité de travail est achevée, la durée de récupération cardiaque des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes est inférieure à 5 minutes.

Les deux variables étudiées dans cette sous-partie sont issues des mesures de fréquence cardiaque telles que :

- La durée de récupération cardiaque réelle ;
- La durée de récupération cardiaque théorique.

Afin d'assurer la validité interne de l'estimation globale de la durée de récupération cardiaque nécessaire après le dégivrage, nous avons choisi d'utiliser deux méthodes de calculs différentes telles que : la durée de récupération cardiaque réelle (T_r) a été calculée à l'issue de la période de dégivrage des 75 avions par les 12 participants de la façon suivante (4.1):

$$T_r = \text{Heure de fin du dégivrage} - \text{Heure d'apparition de RHR} \quad (4.1)$$

Ensuite, la durée de récupération cardiaque théorique (T_{th}) a été calculée à l'issue de la période de dégivrage des 75 avions par les 12 participants selon les méthodes de l'équation (1.2) précédemment présentées en partie 1.6 d'après (Chen & Lee, 1998).

Enfin, pour chaque participant, nous avons estimé la durée médiane de récupération cardiaque qui leur était nécessaire. La Figure 4.7 montre le résultat de cette étude.

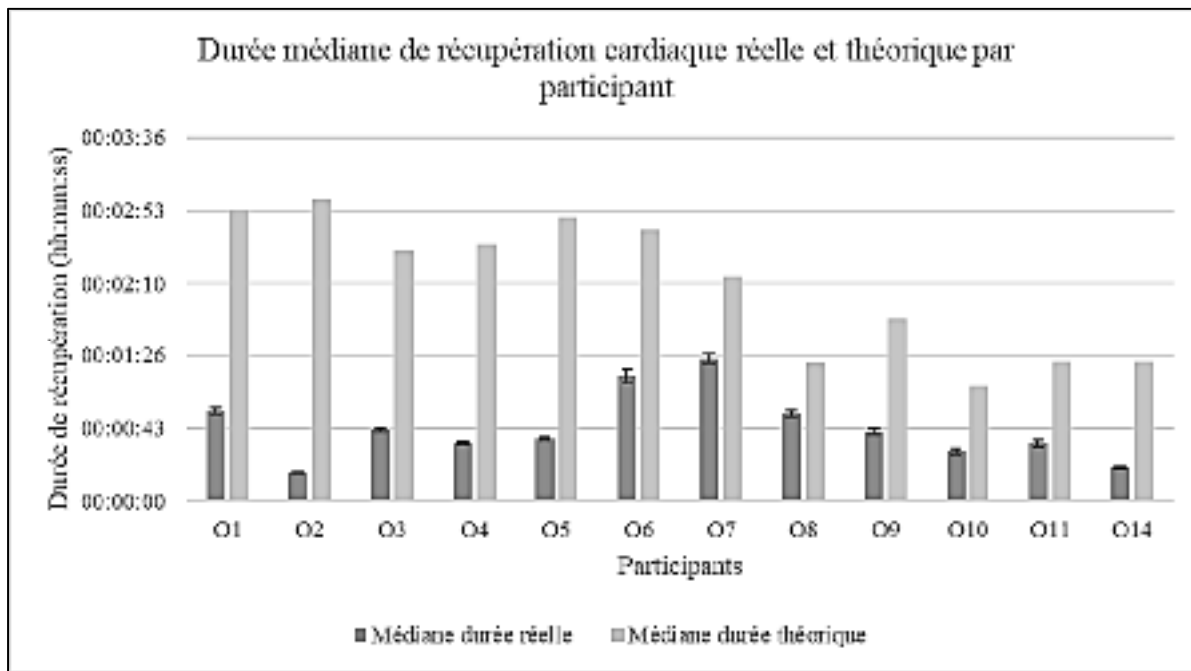


Figure 4.7 Distribution de la durée médiane de récupération cardiaque réelle et théorique pour les 12 participants

A partir de la Figure 4.7, nous pouvons constater que la durée de récupération cardiaque théorique est toujours plus importante que la durée de récupération réelle (Δ durée entre 30s et 2min 42s d'écart de valeurs médianes). Or, nous notons que la durée d'attente entre deux avions est parfois très longue (jusqu'à 51min 55s d'attente) et parfois très courte (parfois il n'y a aucune attente entre deux avions). Dans le cas où il n'y a pas ou très peu d'attente entre deux avions, nous n'avons donc pas pu estimer la durée de récupération réelle. De plus, la durée réelle de récupération cardiaque a été calculée une fois l'activité de dégivrage achevée. Or, probablement qu'une phase de récupération cardiaque active avait débuté avant notre mesure, soit dès lors que l'activité physique était moins fatigante. C'est pour ces raisons que les valeurs médianes de la durée de récupération cardiaque réelle illustrée en Figure 4.7 ont donc été, pour la majorité d'entre elles, probablement sous-estimées. Il serait intéressant de mener des études

futures dans l'analyse des données respiratoires de ces mêmes participants, afin de comparer la durée de récupération respiratoire avec celles estimées de la récupération cardiaque.

Afin de déterminer une durée minimale de pause requise pour tous les techniciens en nacelles ouvertes, nous avons analysé précisément pour chaque avion la durée de récupération réelle et théorique nécessaire. Nous constatons que la durée maximale réelle (4min et 49s \pm 4,6% Voir ANNEXE X, Tableau-A X-3) a été mesurée pour l'un des techniciens (O7), au bout d'environ 1h30 de travail en continu (observé). Or, pour ce même technicien et ce même avion, la durée de récupération théorique indiquait seulement 2min et 9s, soit un écart de 2min 52s. Cet exemple nous montre les limites du calcul théorique, car ce dernier ne prend pas en compte la fatigue cumulée par les activités précédentes. De plus, cet exemple nous permet de répondre à l'hypothèse 3 posée initialement. A l'issue de la période de dégivrage d'avions en nacelles ouvertes, la durée de récupération cardiaque réelle des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes est inférieure à 5 minutes.

Or, afin d'éviter que ces travailleurs aient besoin de plus de 5 minutes de temps de récupération, nous pouvons compléter la recommandation précédemment proposée en partie 4.1.1, en suggérant à l'entreprise d'optimiser leur système de répartition des ressources. Pour cela, l'entreprise pourrait mener une future étude centrée sur l'amélioration de la planification des effectifs et de la répartition du temps de pause, en fonction des tâches fatigantes accomplies, précédemment identifiées dans le CHAPITRE 3. Cette étude permettrait d'aboutir à une meilleure répartition des ressources limitant l'exposition à la fatigue physique des techniciens du dégivrage à la fin de leur journée de travail. Nous suggérons par ailleurs de mener des études complémentaires, auprès d'une population plus importante et dans d'autres aéroports afin de comparer nos résultats. Enfin, d'autres méthodes peuvent être utilisées pour confirmer cette durée de récupération cardiaque nécessaire telle que l'analyse des données de la variabilité cardiaque des techniciens du dégivrage.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire a permis de poursuivre l'étude du facteur humain et de l'ergonomie physique des techniciens du dégivrage d'avions en nacelles ouvertes. Les retombées de cette étude permettront aux entreprises de dégivrage et aux aéroports de cibler les axes d'améliorations pour la santé et la sécurité des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. Pour ce faire, ce mémoire permet notamment de répondre à cinq objectifs spécifiques. Premièrement, de contextualiser la situation de travail du dégivrage en nacelles ouvertes. Deuxièmement, de choisir une méthode de traitement des données permettant d'identifier les causes de fatigue exprimée et d'estimer la durée de récupération nécessaire une fois l'activité de dégivrage achevée. Troisièmement, d'identifier les tâches ayant une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. Quatrièmement, d'identifier les facteurs de stress ayant une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes. Et finalement d'estimer la durée de récupération nécessaire une fois le travail de dégivrage en nacelles ouvertes achevé.

Pour répondre aux deux premiers objectifs, une revue critique de littérature a été effectuée. Cette revue a permis de contextualiser la situation de travail dans son ensemble ainsi qu'en présentant les principaux risques et facteurs de stress auxquels les travailleurs sont exposés. Par ailleurs, cette revue critique de littérature a permis de choisir une méthode de traitement de données cardiaques. Cette méthode d'analyse est construite d'après l'utilisation des limites cardiaques à l'équilibre, le coût cardiaque absolu moyen et le temps de récupération cardiaque.

Une étude de terrain a été réalisée au Canada en 2016-2017 ce qui nous a permis de recueillir des données auprès d'une population de techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes et de répondre notamment au troisième objectif. En effet, les tâches ayant une influence sur la fatigue physique des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes sont les tâches réalisées indépendamment ou réalisées en doubles tâches telles que les tâches d'aspersion de liquide anti/dégivrant, le contrôle spécial au sol, le contrôle tactile et le déplacement de la nacelle et du camion.

En réponse au quatrième objectif, le traitement des données recueillies lors de cette étude de terrain a par ailleurs permis de mettre en avant l'influence du facteur de stress lié à la planification des effectifs de dégivrage, sur la fatigue physique des techniciens en nacelles ouvertes. L'influence des facteurs de stress relatifs aux modèles d'avions dégivrés et aux conditions météorologiques n'a pas pu être démontrée de façon significative dans la présente étude.

En réponse au cinquième objectif, le traitement des données a par ailleurs permis d'estimer à moins de 5 minutes la durée de récupération cardiaque à l'issue de la période de dégivrage pour chaque participant. Cependant, ces résultats ne sont pas significatifs, car ils ont été sous-estimés et ne prennent pas en compte la fatigue cumulée.

Les limites rencontrées lors du recueil de données ont notamment été le nombre important de facteurs de stress, le nombre limité de participants et la contrainte de temps. Ces limites ont rendu difficile la réalisation d'une étude multivariée significative. Par ailleurs, cette étude s'est centrée sur l'étude de la variable de la fréquence cardiaque qui peut être affectée par d'autres facteurs de stress. Ensuite, cette étude a rencontré des limites matérielles liées notamment au matériel d'enregistrement vidéo et à la station de mesures météorologiques.

D'une part, nous suggérons à l'entreprise partenaire de prévenir la fatigue physique des techniciens en nacelles ouvertes en menant une future étude centrée sur l'amélioration de la planification des effectifs et de la répartition du temps de pause, en fonction du temps de réalisation des tâches fatigantes. Cette étude permettrait d'aboutir à une meilleure répartition des ressources limitant l'exposition et l'accumulation de fatigue physique des techniciens du dégivrage à la fin de leur journée de travail. D'autre part, il serait pertinent de mener de nouvelles études afin d'approfondir le traitement de la base de données recueillie lors de cette étude de terrain telle que la variabilité cardiaque ou l'analyse des données respiratoires. Nous recommandons également de mener des études similaires auprès d'une population de techniciens du dégivrage plus conséquente et également au sein d'entreprises de dégivrage centralisées d'autres aéroports soumis à différents facteurs de stress. Enfin, nous

recommandons de compléter la mesure d'impacts météorologiques en procédant à une nouvelle campagne de mesures en plaçant la station météorologique plus proche des baies de dégivrage et éloignée des bâtiments.

ANNEXE I

LISTE DES PUBLICATIONS ET PREUVE DE SOUMISSION

- Articles de revue avec comité de lecture

Le Floch, T., Nadeau, S., Morency, F., & Landau, K. (2018). Identification of physically fatiguing tasks performed during aircraft open-basket ground deicing activities. Soumis pour publication à la revue *International Journal of Industrial Ergonomics* le 24 avril 2018.

Landau, K., Nadeau, S., **Le Floch, T.**, Morency, F. (2017). Ergonomic Time and Motion Studies of Aircraft De-icing Work. *Journal of Ergonomics* 7(204). doi: 10.4172/2165-7556.1000204

- Conférences avec comité de lecture

Le Floch, T., Nadeau, S., Landau, K., & Morency, F. (2018). Aircraft deicing in open-baskets: Study of the effects of activities on heart rate variability. Dans Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Éd.), *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. (Francfort, Allemagne, Fev. 21-23, 2018), vol. 64, GFA Press.

Landau, K., Nadeau, S., **Le Floch, T.**, & Morency, F. (2018). Arbeitsprozesse und Wertschöpfungsbeiträge bei der Flugzeug-Enteisung. Dans Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Éd.), *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. (Francfort, Allemagne, Fev. 21-23, 2018), vol. 64, GFA Press.

- Rapport de recherche de l'ÉTS

Nadeau, S., **Le Floch, T.**, Morency, F., & Landau, K. (2017). *Ergonomie du dégivrage aéronautique en nacelles ouvertes* (Rapport de recherche). Montréal : École de technologie supérieure, 131 pages.

- Conférences de vulgarisation

Le Floch, T., Nadeau, S., Morency, F., & Landau, K. (2017, juin). *Évaluation de la charge de travail physique des dégivreurs en nacelles ouvertes : présentation des résultats préliminaires du projet*. Présentation des résultats à l'entreprise partenaire

Le Floch, T., Nadeau, S., Morency, F., & Landau, K. (2017, décembre). *Évaluation de la charge de travail physique des dégivreurs en nacelles ouvertes : présentation des résultats finaux du projet*. Présentation des résultats à l'entreprise partenaire

Le Floch, T., Nadeau, S., Morency, F., & Landau, K. (2018, janvier). *Évaluation de la charge de travail physique des dégivreurs en nacelles ouvertes*. Conférence de vulgarisation présentée à l'Équipe de recherche en sécurité du travail (ÉREST), Montréal, Canada.

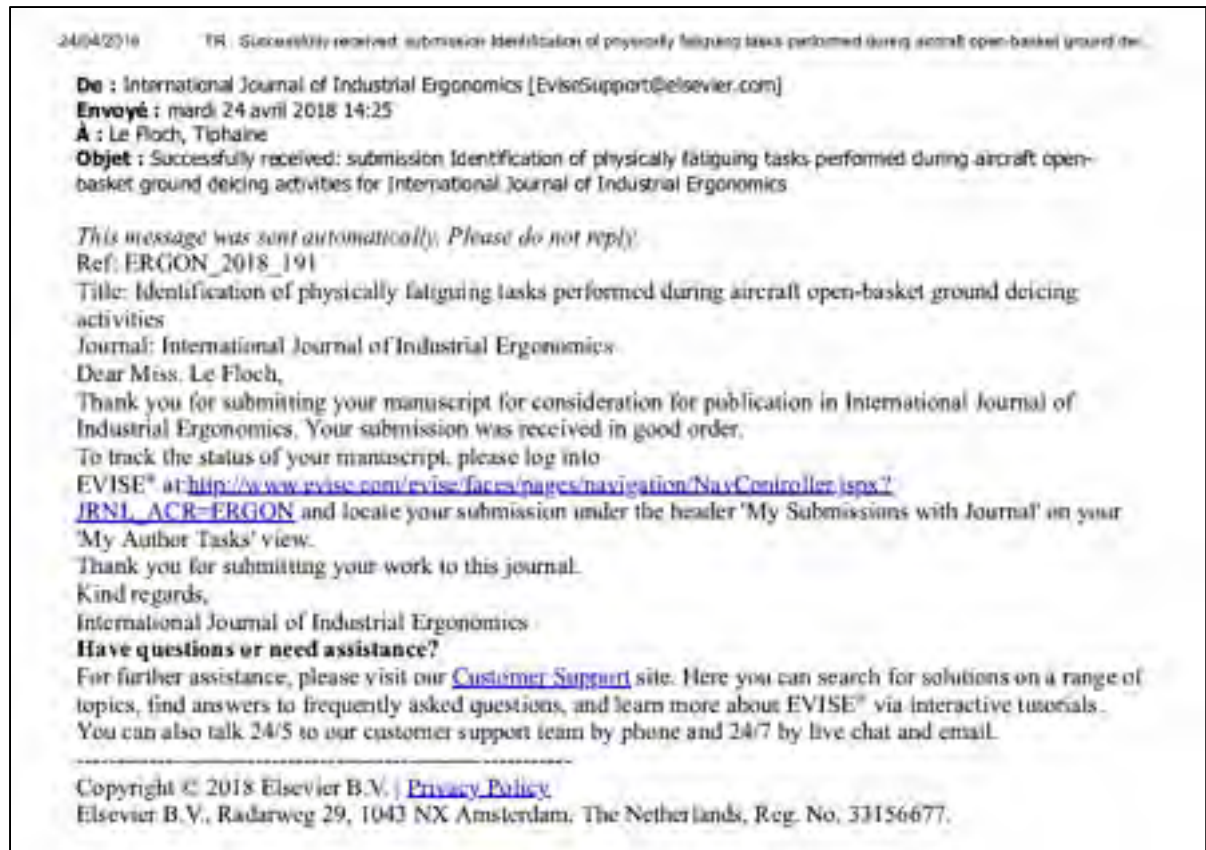


Figure-A I-1 Preuve de soumission de l'article (Le Floch et al., 2018) au journal International Journal of Industrial Ergonomics, le 24 avril 2018

ANNEXE II

CONFÉRENCE GFA 2018

Article de conférence publié à la GfA.

Aircraft deicing in open-baskets: Study of the effects of activities on heart rate variability

Tiphaine LE FLOCH¹, Sylvie NADEAU¹, Kurt LANDAU¹, François MORENCY¹

¹ Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure Montreal, Quebec, Canada

Abstract. Aircraft deicing technicians who work in open-baskets endure physical strain and exposure to health and safety risks. This study aims to identify the tasks that are particularly strenuous and to measure the relationship between aircraft model and physical fatigue. To do this, the study synchronizes video recordings and the data collected by biometric vest to correlate the tasks of 12 subjects with their heart rate. Based on these data, the resting heart rate (RHR) and steady state limit (SSL) are calculated. The results of this study identify the following tasks as fatiguing: spraying de/anti-icing fluids, moving the basket and truck and deicing ground control. Also, the type of aircraft that causes the most physical fatigue is the tail-engine plane.

Keywords: De/anti-icing, aircraft, heart rate, physical fatigue

1. Introduction

Exposed to extreme weather conditions, countries in the Northern hemisphere are under safety obligations to ensure that the critical surfaces of their aircrafts are deiced prior to all take-offs, as stipulated in the Canadian Aviation Regulations (Transport Canada 2015). Aircraft deicing is performed within airports by deicing technicians from open and closed-baskets. The population of deicing technicians working in open-baskets has expressed that they are more tired at the end of their shift than the deicing technicians working from a closed-basket (Torres Medina 2014). Apart from the main hazards related to aviation, fatigue caused by multiple factors can have consequences on the physical health of these workers (Mounet *et al.*, 2013). The objective of this study is to identify strenuous tasks and to measure the relationship between aircraft model and physical fatigue.

2. Methodology

First, a number of observations and measurements were conducted on a sample of 12 voluntary deicing technicians working in open-baskets from a population of 40.

None of the subjects in this study reported suffering from heart conditions. Table 1 summarizes the averages of the subjects' individual data:

Table 1. Average, maximum and minimum values of the subjects' individual characteristics.

Gender	Number	Age (years)			Weight (kg)			Stature (m)		
		Aver.	Min.	Max.	Aver.	Min.	Max.	Aver.	Min.	Max.
Men	10	33	21	54	81.1	68.0	90.7	1.83	1.64	1.95
Women	2	24			56.5	52.0	61.0	1.64	1.57	1.70

Observation of the deicing activity was achieved by video recording using two portable cameras on the open-basket and one camera mounted to the deicing company's control tower. The length of these video recordings is between 60 and 90 minutes for each subject, we therefore obtained 15h52 of video recording of the 12 subjects. As we need to identify the strenuous tasks of the deicing protocol, we selected the most intense activity periods for each subject. Doing so we obtained 8h00 of data to analyze for all the subjects. From this selection, 22 different tasks were identified as taking place during the deicing activity in open-baskets, sometimes occurring separately, sometimes jointly. The heart rate is a good indicator of the level of fatigue and can be used to detect work situations that are more physically demanding (Meyer 1996). Thus, the heart rate of the subjects was measured in beats per minute (bpm), using a Hexoskin MC biometric vest (Carré Technologies Inc., Montreal, Quebec, Canada). Chronological synchronization of the tasks and heart rate data collected occurred each second during the video recordings.

Next, the data was classified according to the types of aircraft that are deiced, which is based on the number of engines and their location. This is the same type of classification as the one used by the company to establish its deicing protocols. The 75 planes observed are grouped according to the following categories: "Tail-engine plane", "Propeller-powered plane" and "Twin-engine jet". Four subjects were excluded, because their heart rate was significantly higher than the steady state limit (SSL), which rendered difficult any comparison of their data with those of the other subjects. The four excluded subjects were two females and two subjects exposed to extreme weather conditions. The remaining eight subjects were divided into two groups, according to the weather conditions in which they were working, namely:

Group 1: 4 men, $-5^{\circ}\text{C} < \text{temperature} < 0^{\circ}\text{C}$, snowing

Group 2: 4 men, $-5^{\circ}\text{C} < \text{temperature} < -2^{\circ}\text{C}$, cloudy

Finally, to analyse the data, first the coefficient of determination (R^2) was calculated for each subject's heart rate on a macroscopic level, that is, for the entire length of the video recordings. Then, a closer study was made of the cardiac load by measuring the resting heart rate (RHR) when the subjects were either standing in the open-basket or sitting in the truck's cab. According to the type of resting position, the following heart rate increase interval (ΔHR) was attributed: $\Delta\text{HR}_{\text{sitting}} = + 35 \text{ bpm}$ or

$\Delta HR_{standing} = + 30$ bpm (Schlick *et al.*, 2010). These last two variables made it possible to calculate each subject's SSL, by which $SSL = RHR + \Delta HR$. Any value above this SSL threshold indicates that subjects are in a state of task-related fatigue. Exhaustion could occur if this threshold is exceeded for too long. These variables make it possible to compare the data according to the tasks being undertaken and type of aircraft being deiced.

3. Results

3.1 Macroscopic analysis of the data

The entire set of values calculated for all 12 subjects are presented in Table 2. These results show that the heart rate's coefficient of determination R^2 for the entire period being measured near toward 0.

Table 2. Average, standard deviation and range of calculated values based on the heart rates (based on entire period measured $n = 15h52min$ and the average length of RHR measurement for each subject = 45 min)

Variables	Average	Standard dev.	Range
R^2	0.0366	0.0403	0.108 – 0.000750
RHR	72.8 bpm	7.83 bpm	86.0 bpm – 62.0 bpm
SSL	107 bpm	7.69 bpm	121 bpm – 97.0 bpm

3.2 Analysis of the physical load per task

This study aims to identify the deicing tasks inside of the basket that are fatiguing, taking into consideration all types of aircrafts and all 12 subjects. To do this, a comparison was made as shown in Figure 1 indicating the percentage of time during which the heart rate was greater than the SSL for each task observed. Results show that the most fatiguing tasks are the spraying of deicing fluids, the spraying of anti-icing fluids, moving the basket and the truck and deicing ground control.

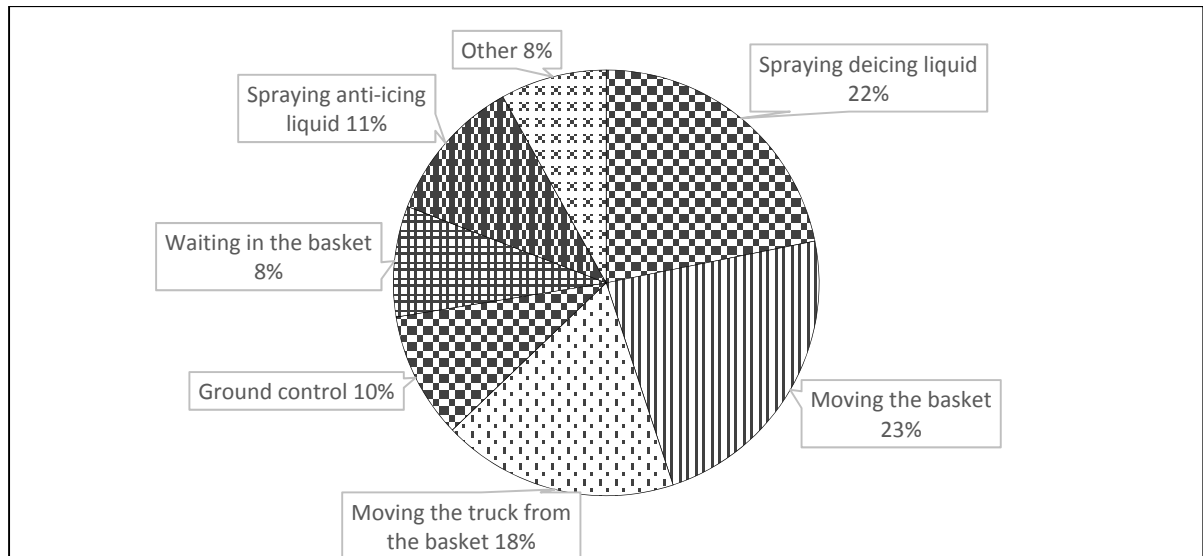


Figure 1. Division of tasks performed when the heart rate is greater than the SSL (based on 8h00 from the analyzed data of the 12 subjects, $HR_{12\text{ subjects}} > \text{SSL}$ during $n = 2\,397\text{s}$)

3.3 Analysis of the physical load according to airplane

This study also aims to establish the effect of the type of aircraft on the workers' level of fatigue. To do this, to best isolate this factor, a distinction was made between the percentage of time during which the heart rate was greater than the SSL for group 1 and that of group 2. We also chose to exclude the waiting periods between two planes. Then, the median of the percentages was calculated according to the type of aircraft being deiced, as illustrated in Figure 2. Some differences were noted in relation to the weather conditions between group 1 and 2. Also, the tail engine planes cause more fatigue for workers than the other airplane types.

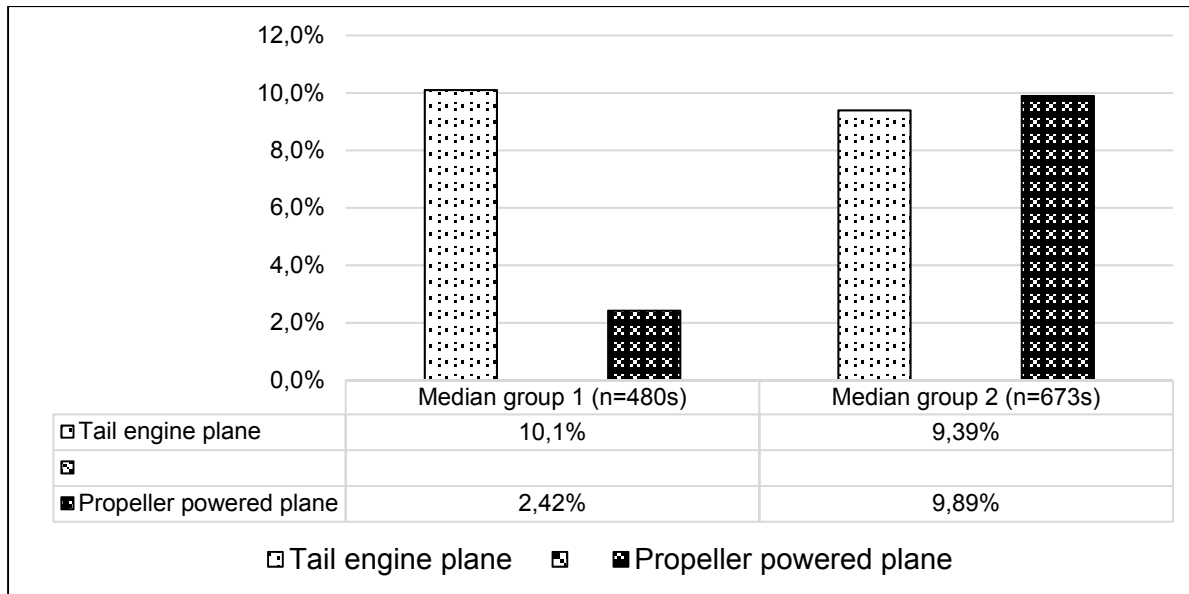


Figure 2. Effects of airplane type being deiced when heart rate is greater than SSL for subjects in group 1 and group 2 (using 6h05 from the analysed data of the eight subjects from group 1+2).

4. Discussion

To begin with, as illustrated in Table 2, the fact that the coefficient of determination R^2 is near 0 for all 12 measurements demonstrates that there is no linear relationship between the heart rate and time lapse, given the heart rate's variability. Therefore, closer examination of this signal for periods of high work load is necessary to identify the causes of physical fatigue.

Additionally, based on the frequency of each task and the amount of time during which the heart rate exceeds the SSL during said task, it was possible to identify the fatiguing tasks, as shown in Figure 1. These conclusions are comparable with those in a study on the energy-expenditures of deicing in open-basket, conducted using the same subjects (Landau *et al.*, 2017). However, to support this result, it would be necessary first to measure the amplitude of the cardiac signal for each task, and second, to analyse the cumulative effect on the level of fatigue of the tasks amongst each other and also to study the recovery heart rate time.

Moreover, if the effects of weather conditions were not taken into account, it was noted that tail engine planes cause the most fatigue. In fact, in a previous study (Torres Medina 2014), the open-basket deicing technicians identified this plane as being particularly problematic. The deicing procedures for these planes require systematic deicing inspection from the ground circling the entire plane while the engines are

running. Yet, this situation is dangerous as it requires them to be in close proximity to the running engines. The worker's heart response during ground control might possibly not be solely affected by physical strain, but by multiple factors and it would be interesting to delve further into these factors in a later study.

The authors of this study are not aware of there being other studies in the literature about heart rate and aircraft deicing. It is therefore impossible to compare the results herein with other reports.

5. Conclusion

This study provides preliminary conclusions in the analysis of the aircraft deicing activity in relation to the heart rate. Despite the study's limited number of subjects, it identifies the most physically fatiguing tasks for deicing technicians, namely: spraying of de/anti-icing fluids, moving the basket, moving the truck and deicing ground control. Furthermore, tail engine planes and their deicing protocol are particularly fatiguing for workers. These results could lead to future studies that further examine open-basket deicing.

6. References

- Landau, K., Nadeau, S., Floch, T.L., Morency, F., (2017). Ergonomic Time and Motion Studies of Aircraft De-icing Work. *Journal of Ergonomics* 7(4).
- Meyer, J. P., (1996). La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une métrologie moderne. I.N.R.S Documents pour le médecin du travail TL 20 (Etude ergonomique) : 8.
- Mounet, M., Morency, F., Nadeau, S., (2013). Integration of humain factors in deicing operations: research and interventions avenues. In *Dokumentation des 59. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses Krefeld 27.02.-01.03.2013* (Krefeld, Germany, Feb. 27-Mar. 1, 2013), p. 291-294. Dortmund, Germany: GfA-Press.
- Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H., (2010). *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg / Dordrecht / London / New York, Springer.
- Torres Medina, Y., (2014). Étude de facteurs ergonomiques associés à la performance de l'opération de dégivrage des ailes d'avion par l'équipe au sol, Rapport technique de M.Ing., École de technologie supérieure : 127.
- Transport Canada, (2015). Règlement de l'aviation canadien Article 602.11 (1) à (7)




Acknowledgments

The authors wish to thank the École de technologie supérieure (ÉTS) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for their financial support in this research project.

ANNEXE III

DIAPORAMA GfA 2018

Diaporama présenté publiquement lors de la conférence de GfA, le 22 février 2018.




AIRCRAFT DEICING IN OPEN BASKETS: STUDY OF THE EFFECTS OF ACTIVITIES ON HEART RATE VARIABILITY

64. GfA conference – February 22nd 2018

LE FLOCH Tiphaine	Student M.Sc.A
NADEAU Sylvie	Director
LANDAU Kurt	Co-director
MORENCY François	Co-director

INTRODUCTION

- Objects of the study:
 - Stress factors on physical workload :
 - Ergonomic (workload, strain, environment)
 - Technologic (aircraft models)
- Context:
 - Deicing aircrafts from open-baskets before take-off
 - Collecting quantitative data of physiological responses
 - 12 aircrafts deicing technicians
 - Winter season 2016-2017



February 22nd 2018

2/14

PLAN

- 1) State of research about aircrafts ground deicing
- 2) Methodology for data collection and analysis
- 3) Results and analysis focused on physiological fatigue
- 4) Discussion

February 22nd 2018

3/14

I – STATE OF RESEARCH

- Canadian Aviation Regulations: (Transport Canada, 2017)
 - Safety obligation to deice the critical surfaces of the aircrafts
 - Obligation to train deicing technicians on deicing procedures
- Main team publications
 - Nadeau and Morency, 2017
 - Identifying possible solutions for greener planes
 - Torres Medina *et al.*, 2016
 - Identifying the stress factors on deicing work performances
 - Qualitative assessment : psycho-physiological fatigue (NASA-TLX)
in open baskets > closed baskets

1 – State of research

2 - Methodology

3 - Results

4 - Discussion

February 22nd 2018

4/14

I – STATE OF RESEARCH

- Limits of the studies
 - Studies based on interdisciplinary literature reviews
 - Qualitative study (Torres Medina *et al.*, 2016)
- Object of research
 - Quantitative analysis of the symptoms of physical fatigue : cardiovascular strain
 - To identify the most strenuous tasks
 - To measure the relationships between physical fatigue with aircraft models + meteo conditions

1 – State of research

2 - Methodology

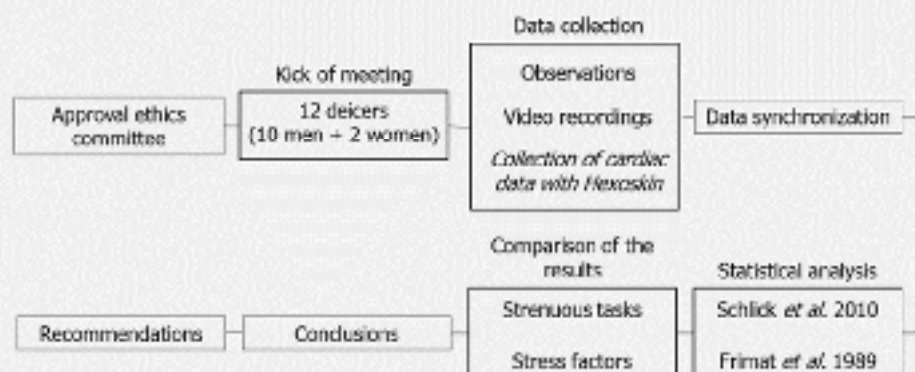
3 - Results

4 - Discussion

February 22nd 2018

5/14

II - METHODOLOGY



1 – State of research

2 - Methodology

3 - Results

4) Discussion

February 22nd 2018

6/14

II - METHODOLOGY

• Schlick *et al.*, 2010



- To determine tasks when **HR > SSL**
- To study duration & frequency of occurrence by task
- To compare results between the tasks with aircraft models and meteorological conditions

February 22nd 2018

1 - State of
research

2 - Methodology

3 - Results

4) Discussion

7/14

II - METHODOLOGY

• Frimat *et al.*, 1989



- To study average amplitude (ΔHR_{avg}) by task
- To compare results between the tasks

February 22nd 2018

1 - State of
research

2 - Methodology

3 - Results

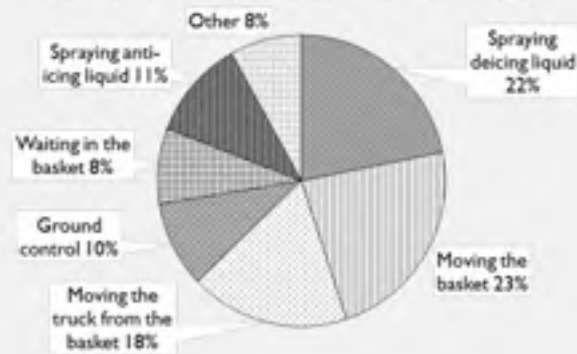
4) Discussion

8/14

III - RESULTS

• Schlick *et al.* 2010 (n = 2397s)

Division of tasks performed when the HR > SSL



February 22nd 2018

9/14

1 - State of research

2 - Methodology

3 - Results

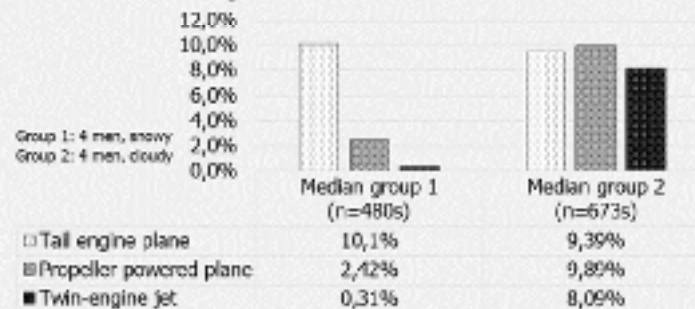
4) Discussion

III - RESULTS

• Schlick *et al.* 2010: aircraft models and meteo conditions

(n = 5h35min19s)

Time distribution when HR > SSL according to meteorological conditions and aircraft models



February 22nd 2018

10/14

1 - State of research

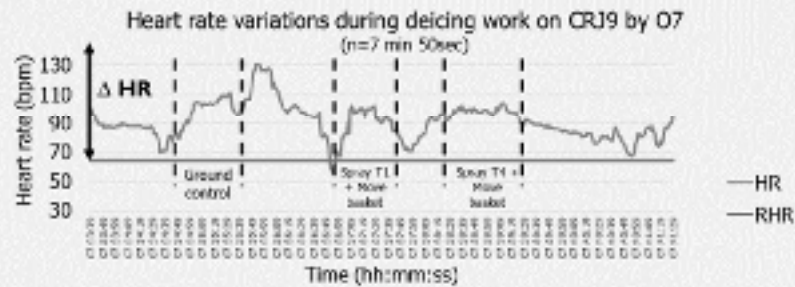
2 - Methodology

3 - Results

4) Discussion

III - RESULTS

• Frimat *et al.* 1989:



$\Delta HR_{mean/tasks}$ greater with 12 participants (n=8h00)

- Tactile control
- Spraying deicing liquid (T1)
- Spraying anti-icing liquid (T4)
- Moving basket
- Ground control

1 – State of research

2 - Methodology

3 - Results

4) Discussion

February 22nd 2018

11/14

IV - DISCUSSION

• Comparison of ΔHR_{mean} with cardiac limits defined by Frimat *et al.*, 1989

- Very strenuous tasks (50 bpm > ΔHR_{mean} > 40 bpm)
- Strenuous tasks (40 bpm > ΔHR_{mean} > 30 bpm)

• Comparing results Schlick *et al.* 2010 with Frimat *et al.* 1989

- Moving basket
- Spraying deicing liquid
- Moving the truck from the basket
- Spraying anti-icing liquid
- Spraying anti-icing liquid + moving basket
- Tactile control + moving basket
- Ground control
- Spraying anti-icing liquid

• Stress factors :

- Aircraft models
- Meteorological conditions

• Limits :

- Number of participants
- Physical fatigue
- Number of stress factors
- Research equipments (cameras)

1 – State of research

2 - Methodology

3 - Results

4) Discussion

February 22nd 2018

12/14

CONCLUSION

- Impacts of our proposals on the deicing company
 - Better understanding of the strenuous tasks and their impacts
 - Identification of the possible further studies
- Further work:
 - Biomechanical study (low back and upper limbs)
 - Heart rate variability analysis
 - Respiratory data analysis

February 22nd 2018

13/14

ACKNOWLEDGMENTS

- Ecole de technologie supérieure (ÉTS), Montréal
- Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)

February 22nd 2018

14/14

ANNEXE IV

SYSTÈME DE TRAVAIL HOMME – MACHINE EN NACELLES OUVERTES

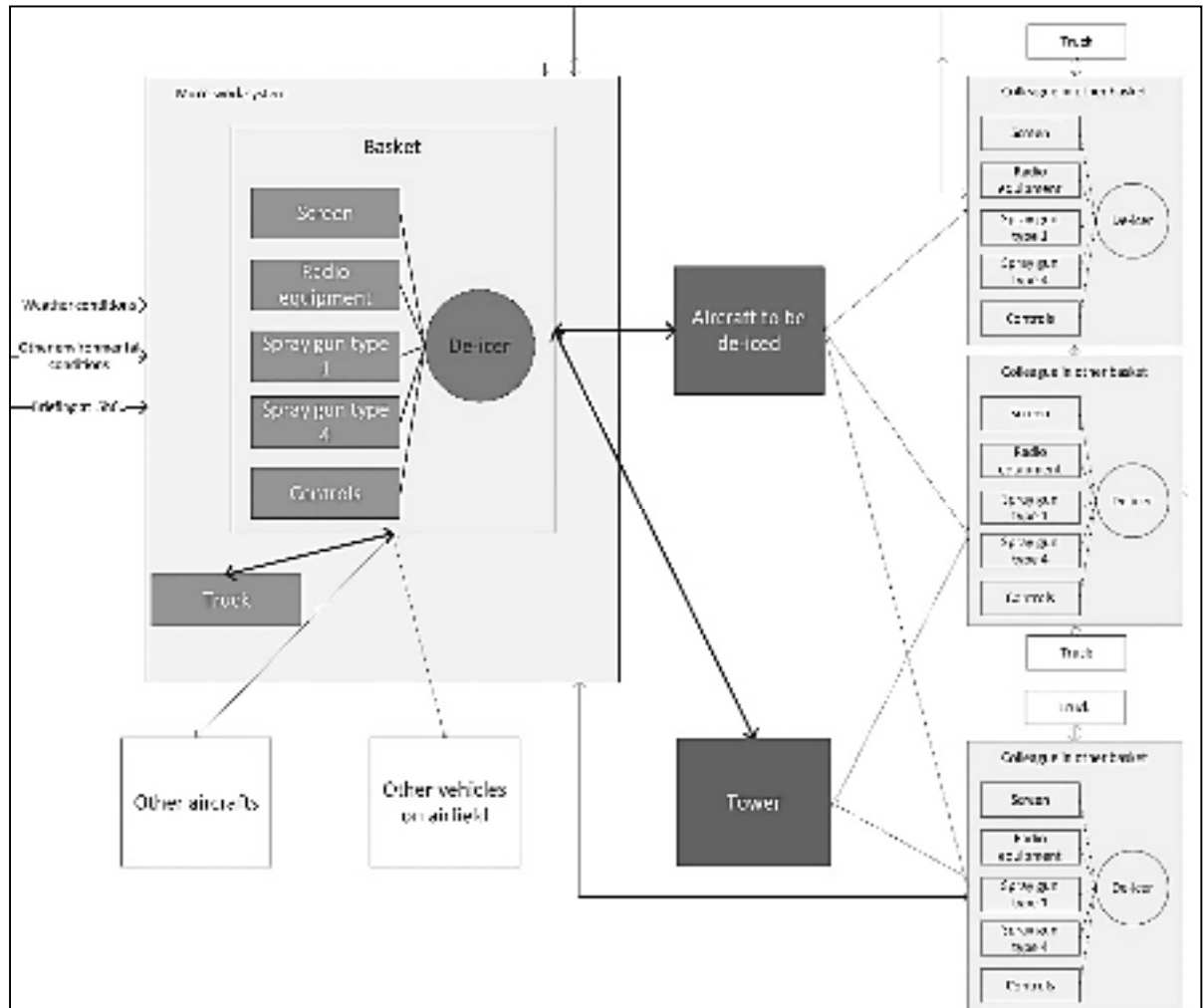


Figure-A IV-1 Illustration du système de travail du dégivrage en nacelles ouvertes homme – machine proposé par (Landau et al., 2017)

ANNEXE V

TABLEAUX REFROIDISSEMENT ÉOLIEN

VALEURS LIMITES D'EXPOSITION TRAVAIL/RÉCHAUFFEMENT POUR UN QUART DE TRAVAIL DE QUATRE HEURES											
Température de l'air Ciel ensoleillé		Aucun vent perceptible		Vent de 8 km/h (Vente de 5 mi/h)		Vent de 16 km/h (Vente de 10 mi/h)		Vent de 24 km/h (Vente de 15 mi/h)		Vent de 32 km/h (Vente de 20 mi/h)	
° C (approx.)	° F (approx.)	Période maximale de travail	Nombre de pauses	Période maximale de travail	Nombre de pauses	Période maximale de travail	Nombre de pauses	Période maximale de travail	Nombre de pauses	Période maximale de travail	Nombre de pauses
-26° à -28°	-15° à -19°	(Pauses normales) 1		(Pauses normales) 1		75 min.	2	55 min.	3	40 min.	4
-29° à -31°	-20° à -24°	(Pauses normales) 1		75 min.	2	55 min.	3	40 min.	4	30 min.	5
-32° à -34°	-25° à -29°	75 min.	2	55 min.	3	40 min.	4	30 min.	5	 L'employé doit cesser de travailler à moins qu'il ne s'agisse d'une urgence ↓	
-35° à -37°	-30° à -34°	55 min.	3	40 min.	4	30 min.	5	 L'employé doit cesser de travailler à moins qu'il ne s'agisse d'une urgence ↓			
-38° à -39°	-35° à -39°	40 min.	4	30 min.	5	 L'employé doit cesser de travailler à moins qu'il ne s'agisse d'une urgence ↓					
-40° à -42°	-40° à -44°	30 min.	5	L'employé doit cesser de travailler à moins qu'il ne s'agisse d'une urgence ↓							
-43° et moins	-45° et moins	L'employé doit cesser de travailler à moins qu'il ne s'agisse d'une urgence									

Figure-A V-1 Valeurs limites d'exposition pour un quart de travail de quatre heures émises par (CNESST, 2011)

ANNEXE VI

DÉTAILS DES ÉPI ET DESCRIPTION DES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES BUSES DE DÉGIVRAGE

Toutes les informations ont été recueillies auprès des responsables de l'entreprise de dégivrage partenaire de cette étude.

- Détails des ÉPI

Tableau-A VI-1 Détail des ÉPI obligatoires et facultatifs

	Équipement de protection individuelle	Actions de protection ou prévention des risques
Obligatoire	Harnais + longe	Risque de chute de hauteur
	Casque de protection auditive	Risque contre les niveaux sonores élevés
Facultatif	Bouchons de protection auditive	Risque contre les niveaux sonores élevés
	Lunettes de sécurité	Exposition aux liquides dégivrants et antigivrants
	Masque respiratoire	
	Gants en nitrile	
	Gants de caoutchouc	Exposition au refroidissement éolien

Deux modèles de casques de protection auditive sont utilisés par les techniciens du dégivrage.

- Cobalt headset CH-11, utiliser en premier lieu :
- David Clark H10 13.4, la contingence radio :

- Description des caractéristiques techniques des buses de dégivrage

Deux modèles de buses de dégivrage sont utilisés, respectivement pour le liquide dégivrant et antigivrant.

- Type 1 : (liquide dégivrant), buse Task Force Tip, modèle : BGH-HT120-PD.
- Type 4 : (liquide antigivrant), buse Rosenbauer Nepiro jaune.

ANNEXE VII

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DÉLIVRÉ PAR L'ÉTS

 Le génie pour l'industrie	Comité d'éthique de la recherche École de technologie supérieure	
Date : 16 novembre 2016	H20161001	Nouvelle
OBJET :	Titre du projet : Ergonomie du dégivrage aéronautique en nacelles ouvertes	
	Responsable du projet : Sylvie Nadeau	
	Décision : APPROBATION FINALE	

Madame,

Les modifications et précisions demandées par le CÉR dans sa lettre du 28 octobre 2016 ayant été apportées adéquatement, votre projet peut aller de l'avant.

Veuillez toutefois noter que cette approbation n'est valable que pour une année, soit jusqu'au 16 novembre 2017. Vous devrez donc annuellement demander le renouvellement de l'approbation au Comité, sans quoi le projet sera considéré comme terminé. Dans la perspective où il devait être terminé, vous devrez fournir un rapport final suivant le modèle disponible sur la page Internet de l'ÉTS. Ce rapport est attendu pour le 31 mai 2018.

Veuillez agréer, Madame, l'expression de mes sentiments les meilleurs.


Comité d'éthique de la recherche

DATE DE FIN DE L'APPROBATION
16 novembre 2017

Figure-A VII-1 Certificat d'éthique délivré par l'ÉTS

ANNEXE VIII

QUESTIONNAIRE COMPLÉTÉ LORS D'ENTREVUES SEMI-DIRIGÉES

Ce questionnaire a été soumis lors d'entrevues semi-dirigées auprès de 11 techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes.

Tableau-A VIII-1 Questionnaire complété pendant les entrevues semi-dirigées

Thèmes génériques	N°	Questions
Organisation du travail	1	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant l'organisation de votre journée de travail, l'horaire de travail.
	2	Veillez évaluer l'importance des contraintes causées par l'aménagement du temps travail et la charge de travail. (Charge de travail dépendante de la météo, période d'inactivité très courte certains jours, et parfois très longues).
	3	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant l'adéquation entre l'effet récupérateur des pauses planifiées et la charge de travail.
	4	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant la charge de travail en lien avec la multiplicité des tâches exécutées en même temps (s'il y en a).
Charge physique	5	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant les différentes postures prises à l'occasion du travail.
	6	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant l'adéquation entre les efforts physiques requis pour exécuter votre travail et votre capacité physique.
	7	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant la manutention manuelle (activités répétitives avec doigts/mains)
Charge psychique	8	Veillez évaluer le niveau d'exigences concernant la perception visuelle (visualiser la présence de glace à plusieurs mètres de distance).
	9	Veillez évaluer le niveau d'exigences concernant la perception auditive (contact vocal aisé ou non à travers le casque).

	10	Veillez évaluer le niveau d'exigences concernant la perception tactile (contact tactile à travers ou sans les gants).
	11	Veillez évaluer votre niveau de responsabilité relative à des personnes ou à des objets.
	12	Veillez évaluer le niveau de concentration et le savoir-faire nécessaires à votre activité de travail.
	13	Veillez évaluer la probabilité des critiques et le potentiel de conflits avec vos pairs ou vos supérieurs dans votre travail quotidien.
Conditions environnementales	14	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant les conditions d'éclairage et d'éclairement pour les tâches visuelles les plus importantes.
	15	Veillez évaluer votre niveau d'exposition au bruit.
	16	Veillez évaluer votre niveau de contrainte concernant les contraintes climatiques. Ici en particulier par le froid.
	17	Veillez évaluer le niveau des contraintes causées par des vibrations mécaniques.
	18	Veillez évaluer le niveau de risque causé par l'exposition aux substances dangereuses utilisées.
	19	Veillez évaluer le niveau des principaux risques d'accidents auxquels vous êtes exposés.
	20	Veillez évaluer le niveau d'interférence supplémentaire causé par les équipements de protection individuelle.

ANNEXE IX

ÉVALUATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL

L'outil CDT est un outil simplifié de l'Arbeitswissenschaftliches Erhebungsverfahren zur Tätigkeitsanalyse (AET) développé par (Landau & Rohmert, 1981) évaluant 24 items selon des plusieurs niveaux de contrainte bien définis dans une liste de contrôle tels que :

Tableau-A IX-1 Tableau des 24 items caractérisant la charge de travail ainsi que les niveaux de contrainte définis, adapté de (Landau & Rohmert, 1981)

Items	Niveaux	Items	Niveaux
1 : Éclairage / éclairage	0 - 4	13 : Multiplicité des tâches	0 - 4
2 : Nuisances sonores	0 - 4	14 : Perception visuelle	0 - 4
3 : Climat / chaleur	0 - 4	15 : Perception auditive	0 - 4
4 : Climat / froid	0 - 4	16 : Perception gustative / olfactive	0 - 4
5 : Vibrations mécaniques	0 - 4	17 : Perception tactile	0 - 4
6 : Subst. Dang. Respiratoires	0 - 4	18 : Responsabilité relative à des personnes	0 - 4
7 : Subst. Dang. Peau	0 - 4	19 : Maîtrise de la tâche	0 - 4
8 : Risques potentiels	0 - 4	20 : Concentration / savoir faire	0 - 4
9 : Équipement de protection individuelle	0 - 4	21 : Critique / conflit	0 - 4
10 : Horaires de travail	0 - 4	22 : Postures de travail	0 - 7
11 : Contrainte de temps / charge de travail	0 - 4	23 : Type de travail physique	0 - 6
12 : Pause de travail	0 - 4	24 : Tenir / déplacer mains / doigts	0 - 5

Dans l'étude ici présente, nous nous sommes appuyés sur cet outil pour construire notre questionnaire et évaluer la charge de travail des techniciens du dégivrage. Pour cela, lors des 11 entrevues avec les travailleurs, nous leur avons demandé d'évaluer le niveau de contrainte des 24 items listés précédemment tel que 0 représente un niveau de contrainte optimal et 4 ou 7 (selon l'item) représentant un niveau de contrainte très élevé. Pour l'évaluation de chaque item, les travailleurs pouvaient répartir leur évaluation sur plusieurs niveaux de contrainte (e.g. : pour l'item 1, sur le niveau de contrainte relatif à l'éclairage/éclairage, sur un quart de travail de 8h, soit 100% du temps de travail, les travailleurs du matin expriment être à un niveau de contrainte très élevé, soit niveau 4, durant en moyenne 30% du temps et à un niveau de contrainte optimal, soit niveau 0, durant en moyenne 70% du temps de travail.)

Dans l'outil EXCEL développé et complété à partir des réponses au questionnaire, pour chaque technicien nous avons calculé le pourcentage de niveau de contrainte global de chaque item en attribuant un coefficient aux réponses données. Puis, nous avons calculé la moyenne par participant de la charge physique (items grisés dans le tableau précédent) et de la charge mentale (items clairs dans le tableau précédent). Enfin, nous avons rassemblé les résultats dans le cadastre suivant selon la charge physique et la charge mentale tels que :

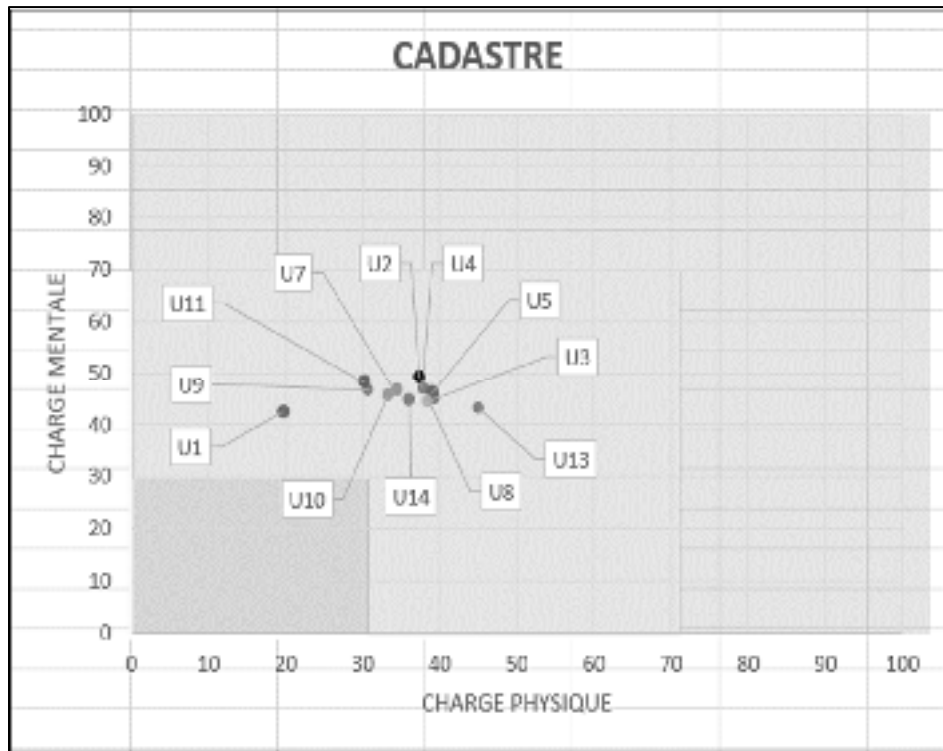


Figure-A IX-1 Cadastre de la répartition de la charge de travail physique et mentale des techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes, tirée de (Nadeau et al., 2017)

Les limites vertes, jaune et rouge ont été établies par les résultats de l'étude de (Landau & Rohmert, 1981). Ce cadastre nous a permis de constater que les techniciens du dégivrage en nacelles ouvertes sont classifiés par l'outil CDT dans la zone jaune, ce qui signifie que leur charge de travail (mentale et physique) mérite une intervention.

ANNEXE X

MARGES D'ERREUR

- **Chapitre 3 : Article de revue**

Pour déterminer la marge d'erreur selon la RHR, nous avons fait la somme des erreurs absolues en fonction du nombre de fois où la fréquence cardiaque des travailleurs étudiés, dépassait la RHR. En effet, la fréquence cardiaque étant donnée par seconde, nous avons donc une erreur absolue de ± 1 seconde lorsque la fréquence cardiaque dépasse la limite RHR. En effectuant la moyenne des erreurs absolues calculées sur les 75 avions étudiés (soit durant 25 936 secondes) nous avons une erreur absolue moyenne de ± 12 s par avion, soit ± 900 s sur les 25 936s étudiées. Notre marge d'erreur autour de la RHR est de $\pm 3,47\%$.

Pour déterminer la marge d'erreur selon la SSL, nous avons fait la somme des erreurs absolues en fonction du nombre de fois où la fréquence cardiaque des travailleurs étudiés, dépassait la SSL. Comme précédemment, la fréquence cardiaque étant donnée par seconde, nous avons donc une erreur absolue de ± 1 seconde lorsque la fréquence cardiaque dépasse la limite SSL. En effectuant la moyenne des erreurs absolues calculées sur les 75 avions étudiés (soit durant 2 397s) nous avons une erreur absolue moyenne de ± 2 secondes par avion, soit ± 150 s sur les 2 397s étudiées. Notre marge d'erreur autour de la RHR est de $\pm 6,26\%$.

- **Chapitre 4 : Analyses complémentaires**

En partie 4.1 de ce chapitre, nous avons travaillé avec la limite SSL selon la fréquence cardiaque. Nous avons par conséquent appliqué la même valeur absolue de ± 2 secondes par avion, comme présentée dans le paragraphe au-dessus.

La marge d'erreur illustrée en Figure 4.1 est calculée de la façon suivante :

Marge d'erreur = Médiane x erreur relative

Tableau-A X-1 Démarche de calcul de la marge d'erreur pour les résultats figurant en Figure 4.1

	2 techniciens	3 techniciens	4 techniciens	5 techniciens
Nb avions	8	20	38	9
Erreur absolue	± 16s	± 40s	± 76s	± 18s
Durée FC > SSL	329s	482s	1 425s	161s
Erreur relative	± 4,86%	± 4,15%	± 5,33%	± 11,18%
Marge d'erreur	± 0,31%	± 0,24%	± 0,29%	± 0,43%

La marge d'erreur illustrée en Figure 4.6 est calculée de la façon suivante :

Marge d'erreur = Médiane x erreur relative

Tableau-A X-2 Démarche de calcul de la marge d'erreur pour les résultats figurant en Figure 4.6

Modèles	Moteurs queue		Moteurs hélices		Deux moteurs ailes	
Groupes	1	2	1	2	1	2
Nb avions	5	3	7	6	18	14
Erreur absolue	± 10s	± 6s	± 14s	± 12s	± 32s	± 28s
Durée FC > SSL	218s	81s	101s	217s	161s	375s
Erreur relative	± 4,59%	± 7,40%	± 13,86%	± 5,50%	± 19,88%	± 7,46%
Marge d'erreur	± 0,69%	± 0,69%	± 0,34%	± 0,54%	± 0,062%	± 0,60%

En partie 4.2 de ce chapitre, nous avons travaillé avec la limite RHR selon la fréquence cardiaque. Nous avons par conséquent appliqué la même valeur absolue de $\pm 12s$ par avion, comme présentée dans le paragraphe au-dessus. La marge d'erreur illustrée en Figure 4.7 est calculée de la façon suivante :

Tableau-A X-3 Démarche de calcul de la marge d'erreur pour les résultats figurant en Figure 4.7

Code alphanumérique	Nb avions	Erreur absolue	Durée FC > RHR	Marge d'erreur
O1	4	$\pm 48s$	1 231s	$\pm 3,90\%$
O2	6	$\pm 72s$	3 567s	$\pm 2,02\%$
O3	5	$\pm 60s$	1 926s	$\pm 3,12\%$
O4	6	$\pm 72s$	2 221s	$\pm 3,24\%$
O5	7	$\pm 84s$	3 258s	$\pm 2,58\%$
O6	4	$\pm 48s$	792s	$\pm 6,06\%$
O7	7	$\pm 84s$	2 515s	$\pm 3,34\%$
O8	8	$\pm 96s$	2 672s	$\pm 3,59\%$
O9	7	$\pm 84s$	1 823s	$\pm 4,61\%$
O10	8	$\pm 72s$	1 377s	$\pm 5,23\%$
O11	10	$\pm 120s$	1 992s	$\pm 6,02\%$
O14	5	$\pm 60s$	2 562s	$\pm 2,34\%$

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aventin, A., Morency, F., & Nadeau, S. (2015). Statistical Study of Aircraft Accidents and Incidents Related to Deicing/Anti-Icing Procedures in Canada between 2009 and 2014. *62nd CASI Aeronautics Conference and AGM 3rd GARDN Conference* (pp. 201-209). Ottawa, ON: Canadian Aeronautics and Space Institute. Repéré à https://aero2015.exordo.com/files/papers/121/final_draft/121_Aventin_etal_AERO2015.pdf
- Ayache, A., Morency, F., & Nadeau, S. (2013). Fatigue assessment of workers responsible for deicing aircrafts on the ground and its effects on their performance. *60th CASI Aeronautics Conference and AGM: Aerospace clusters: where are we headed?*. Ottawa, ON: Canadian Aeronautics and Space Institute. Repéré à <http://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/7663>
- Brown, A. P. (2011). Aircraft performance degradation: The effects of inflight icing upon lift, drag and propulsive efficiency. *SAE 2011 International Conference on Aircraft and Engine Icing and Ground Deicing*, 38(73). doi: 10.4271/2011-38-0073
- Bruder, R. (1994). Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur belastungsanalytisch unterscheidbaren Erholungszeit [Développement d'un système basé sur les connaissances pour les temps de récupération qui peuvent être différenciés par l'analyse du stress]. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 48(2). Repéré à <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45599/>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (1995). *Rapport d'enquête sur accident aéronautique : collision avec un véhicule Royal Air Maroc, boeing 747-400 CN-RGA aéroport international de Montréal à Mirabel (Québec) 21 janvier 1995*. (Rapport n° A95Q0015). Repéré à <http://www.bst-tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/1995/a95q0015/a95q0015.pdf>
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2013). Éclairage ergonomique : fiche d'information SST. Repéré à https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/lighting_survey.html?=&wbdisable=true
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2016). Effets des vibrations sur la santé : fiche d'information SST. Repéré à https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/vibration/vibration_effects.html
- Chen, Y. L., & Lee, Y. H. (1998). Effect of combined dynamic and static workload on heart rate recovery cost. *Ergonomics*, 41(1), 29-38. doi: 10.1080/001401398187305

- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2011). *Travailler au froid ! Prévenir et soigner les gelures et l'hypothermie* [Version brochure n° DC 200-16182 7]. Repéré à http://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/200/Pages/dc_200_16182.aspx
- Environnement Canada. (2014). *Refroidissement éolien : un fait qui donne le frisson* [Version publication du gouvernement du Canada]. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2014/ec/En56-222-2-2014-fra.pdf
- European Aviation Safety Agency. (2009). *Study on the regulation of ground de-icing and anti-icing services in the EASA Member States* (Rapport n°EASA.2009/4). Repéré à <https://www.easa.europa.eu/document-library/research-projects/easa20094#group-easa-downloads>
- Frimat, P., Chamoux, A., De Gaudemaris, R., Cantinaux, A., & Amphoux, M. (1989). Heart rate and work. What use? What criteria?. *Archives des maladies professionnelles*, 50(4), 357-360.
- Gonthier, C., Monin, E., De Gaudemaris, R., Blatier, J. F., Perdrix, A., & Mallion, J. M. (1985). Étude de la charge physique de travail de sapeurs-pompiers professionnels par enregistrement de la fréquence cardiaque sur 24 heures. *Archives des maladies professionnelles de médecine du travail et de sécurité sociale*, 46(7-8), 465-468.
- Gomes, R., Liteplo, R., & Meek, M. E. (2002). *Ethylene glycol: Human health aspects* (Rapport n°45). Repéré à <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad45.pdf>
- Green, S. D. (2008). A Study of U. S. Inflight Icing Accidents, 1978 to 2002. *44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibition*. Reston, VA: Aerospace Sciences Meetings. doi: 10.2514/6.2006-82
- Günebak, S., Nadeau, S., Morency, F., & Sträter, O. (2015). Towards a safer and more efficient communication process for aircraft ground deicing: Review of human factors and team communication literature. *62nd CASI Aeronautics Conference and AGM 3rd GARDN Conference* (pp. 189-199). Ottawa, ON: Canadian Aeronautics and Space Institute. Repéré à https://aero2015.exordo.com/files/papers/156/final_draft/_Guenebak_etal_AERO2015.pdf
- Günebak, S., Nadeau, S., Morency, F., & Sträter, O. (2016). Aircraft ground deicing as a complex sociotechnical system: towards a safer and more efficient communication process for aircraft ground deicing. *Frühjahrskongress: Arbeit in komplexen Systemen. Digital, vernetzt, human?*. Dortmund, Allemagne: GfA-Press. Repéré à <http://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/12394/>

- Helbig, R., & Rohmert, W. (2011). Fatigue and Recovery - Physical and Physiological Aspects. Dans International Labour Organization (Éd.), *Encyclopaedia of Occupational Health & Safety*. Repéré à <http://www.iloencyclopaedia.org/part-iv-66769/ergonomics-52353/physical-and-physiological-aspects/42-physical-and-physiological-aspects/fatigue-and-recovery>
- International Air Transport Association. (2016). Passenger Demand Growth Slows [Communiqué de presse n°24]. Repéré à <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-06-30-02.aspx>
- International Organization for Standardization. (1997). *Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 1 : Spécifications générales*. Norme ISO 2631-1:1997. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- International Organization for Standardization. (2001). *Vibrations mécaniques : Mesure et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main corps - Partie 1 : Exigences générales*. Norme ISO 5349-1:2001. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- International Organization for Standardization. (2004). *Ergonomie de l'environnement thermique - Détermination du métabolisme énergétique*. Norme ISO 8996 : 2004. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- Landau, K., Nadeau, S., Le Floch, T., & Morency, F. (2017). Ergonomic Time and Motion Studies of Aircraft De-icing Work. *Journal of Ergonomics*, 7(204). doi: 10.4172/2165-7556.1000204
- Landau, K., & Rohmert, W. (1981). Einführung in die Arbeitsanalyse [Introduction à l'analyse du travail]. Dans Hans Huber (Éd.), *Fallbeispiele zur Arbeitsanalyse* (pp. 7-33). Repéré à <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/44995/>
- Le Floch, T., Nadeau, S., Landau, K., & Morency, F. (2018). Aircraft deicing in open-baskets: Study of the effects of activities on heart rate variability. *64e GfA-Frühjahrskongress: Arbeit(s). Wissen.Schaf(f)t Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung*. Dortmund, Allemagne: GfA-Press.
- Leedy, P. D., & Ormrod, J. E. (2013). Chapter 6: Qualitative Research. Dans Pearson Education (Éd.), *Practical research: Planning and Design* (10^e éd., pp. 139-170). Boston: Pearson Education.
- Levak, K., Horvat, M., & Domitrović, H. (2008). Effects of noise on humans. *50th International Symposium ELMAR-2008* (pp. 333-336). New York, NY: IEEE. Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4747500>

- Luczak, H., Philipp, U., & Rohmert, W. (1980). Decomposition of heart rate variability under ergonomic aspects of stressor analysis. Dans R. I. Kitney, & O. Rompelman (Éd.), *The study of heart-rate variability* (pp. 123-177). Oxford, Royaume-Uni: Clarendon press.
- Luczak, H., & Rohmert, W. (1976). Anpassungsreaktion von Arbeitspersonen bei ergonomischen Feldstudien informatorischer Arbeitsinhalte [Étude de terrain sur l'exposition des sujets dans des conditions de travail informatives]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 35(1), 31-47. doi: 10.1007/BF00444655
- Malchaire, J. (1988). Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. *Cahiers de Médecine du Travail*, 25(4), 181-186.
- Marcotte, P. (2014, novembre). *Evaluation et réduction du risque vibratoire pour le corps entier et le système main-bras*. Communication présentée à 18e Carrefour en SST et remise des Grands Prix SST, Drummondville, QC.
- Martin, R., Deshaies, P., & Poulin, M. (2015). *Avis sur une politique québécoise de lutte au bruit environnemental : pour des environnements sonores sains* (Rapport n°978-2-550-74108-4). Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2048_politique_lutte_bruit_environnemental.pdf
- Meyer, J. P. (1996). La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une métrologie moderne. *Documents pour le médecin du travail*, 4(68), 315-322. Repéré à <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TL%2020>
- Morinière, E., Morency, F., & Nadeau, S. (2014, mars). *Ethylene glycol and workers: A study of documented exposures*. Affiche présentée Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften - Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft, Munich, Allemagne (pp. 584-586). Repéré à <http://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/7651/>
- Moshansky, V. P. (1992). *Final report commission of Inquiry into the Air Ontario Crash at Dryden, Ontario* (Rapport n° TL553.5.C65). Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2014/bcp-pco/CP32-55-1-1992-1-eng.pdf
- Mounet, M., Morency, F., & Nadeau, S. (2013). Integration of human factors in deicing operations: research and interventions avenues. *Chancen durch Arbeits-, Produkt und Systemgestaltung: Zukunftsfähigkeit für Produktions und Dienstleistungsunternehmen* (pp. 291-294). Dortmund, Allemagne: GfA-Press.
- Mueller, E. A. (1950). Ein Leistungs-Pulsindex als Maß der Leistungsfähigkeit [L'indice du pouls cardiaque comme mesure de performance]. *Arbeitsphysiologie*, 14(3), 271-284. doi: 10.1007/BF00933845

- Nadeau, S., Le Floch, T., Morency, F., & Landau, K. (2017). *Rapport de recherche : Ergonomie du dégivrage aéronautique en nacelles ouvertes*. Document inédit, Département mécanique, École de technologie supérieure, Montréal, QC.
- Nadeau, S., & Morency, F. (2017). De-icing of aircraft: Incorporating business risks and occupational health and safety. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 7(2), 247-266. doi: 10.2495/SAFE-V7-N2-247-266
- Nadeau, S., Salmanzadeh, H., Ahmadi, M., & Landau, K. (2018). *Aviation Deicing Workers, Global Risk Assessment of Musculoskeletal Injuries*. Manuscrit soumis pour publication.
- Organisation de l'Aviation Civile Internationale. (2017). Croissance du trafic et rentabilité : points saillants du transport aérien en 2016 [Communiqué de presse]. Repéré à <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/traffic-growth-and-airline-profitability-were-highlights-of-air-transport-in-2016.aspx>
- Rohmert, W., Laurig, W., Philipp, U., & Luczak, H. (1973). Heart rate variability and work-load measurement. *Ergonomics*, 16(1), 33-44. doi: 10.1080/00140137308924480
- Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2010). Chapter 3: Arbeitsformen. Dans Springer, Berlin, Heidelberg (Éd.), *Arbeitswissenschaft* (pp. 223-432). doi: 10.1007/978-3-540-78333-6
- Sierra, E. A., Bender, K., Marcil, I., D'Avirro, J., Pugacz, E., & Eyre, F. (2006). *Human Visual and Tactile Ice Detection Capabilities under Aircraft Post Deicing Conditions*. (Rapport n°DOT/FAA/TC-06/21). Repéré à <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc06-21.pdf>
- Sperandio, J. C. (1984). *Collection de psychologie appliquée : L'ergonomie du travail mental* (2e éd.). Paris: Masson.
- Terrace, S. M., Bender, K. D., Sierra, J. R., Edmundo, A., Marcil, I., D'Avirro, J., ... Eyre, F. (2006). Comparison of Human Ice Detection Capabilities and Ground Ice Detection System Performance under Post Deicing Conditions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(17), 2051-2055. doi: 10.1177/154193120605001772
- Torres, Y., Morency, F., & Nadeau, S. (2013). Factors Influencing Performance of on Ground Aircraft Deicing Operation: Ergonomics and Occupational Safety Perspectives. *American Industrial Hygiene Conference & Exposition AIHce 2013*. Falls Church, VA: American Industrial Hygiene Association. Repéré à <http://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/7654/>

- Torres, Y. (2014). *Étude de facteurs ergonomiques associés à la performance de l'opération de dégivrage des ailes d'avion par l'équipe au sol*. (Rapport de projet, École de technologie supérieure, Montréal, Canada).
- Torres, Y., Nadeau, S., & Morency, F. (2016). Study of fatigue and workload among aircraft de-icing technicians. *Occupational Ergonomics*, 13(2), 79-90. doi: 10.3233/OER-160240
- Transports Canada. (2015). *Partie VI – Règles générales d'utilisation de vol des aéronefs : Opérations dans des conditions de givrage au sol*. Norme TC 622.11 (1) à (7). Repéré à <http://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/servreg/rac/partie6-normes-norme622-513.htm>
- Trudeau, F., & Bouchard, D. R. (2006). *Étude et recherches : Reproductibilité de la relation fréquence cardiaque et consommation d'oxygène* (Rapport n°R-466). Repéré à <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-466.pdf>
- Wu, H. C., Hsu, W. H., & Chen, T. (2005). Complete recovery time after exhaustion in high intensity work. *Ergonomics*, 48(6), 668-679. doi: 10.1080/00140130500070871